

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

ANDRESSA LORENZON

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO APÓS
EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

ANDRESSA LORENZON

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO APÓS
EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Mário Arlindo Irrigaray Paz.

PATO BRANCO

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA RESIDUAL DO CONCRETO APÓS EXPOSIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

ANDRESSA LORENZON

Aos 10 dias do mês de fevereiro do ano de 2014, às 15:15h, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 05 – TCC/2014.

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

Membro 1 da Banca: Prof^a. Dr^a. CAROLINE ANGULSKI DA LUZ (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. ROGÉRIO CARRAZEDO (DACOC / UTFPR – PB)

DACOC / UTFPR – PB
www.pb.utfpr.edu.br/ecv

Via do Conhecimento, Km 1 CEP 85503-390 Pato Branco – PR
Fone: +55(46)3220-2560

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar a Deus, pela força e coragem durante toda essa longa caminhada.

Aos meus pais, Roberto e Eliane Lorenzon, minha irmã Ana Laura e meu namorado Luciano Ceni, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforço para que eu chegasse até essa etapa da minha vida.

Ao Professor Mário Paz pela paciência na orientação e incentivos que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta experiência.

Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

Aos professores e estagiários dos laboratórios de química e mecânica deste campus, que foram compreensivos com as minhas necessidades e ajudaram de diversas formas.

E a todos que de alguma forma ajudaram, agradeço por acreditarem no meu potencial, nas minhas ideias, nos meus devaneios, principalmente quando nem eu mais acreditava.

RESUMO

O concreto é conhecido por apresentar um bom desempenho perante as altas temperaturas por possuir baixa condutividade térmica, não ser combustível e não exalar gases tóxicos. Entretanto, devido à composição heterogênea desse material, quando exposto a situações como incêndios, sofre alterações físicas, químicas e mecânicas que podem comprometer sua integridade estrutural. Com objetivo de analisar a resistência residual do concreto submetido a altas temperaturas, realizaram-se ensaios de compressão uniaxial em corpos-de-prova submetidos a diferentes temperaturas (300° C, 500° C e 900° C), tempos de exposição (30, 60 e 90 minutos) e modos de resfriamento (brusco e lento). A dosagem foi realizada com vistas ao atendimento dos requisitos da NBR 6118 e NBR 12655, as quais propõem valores mínimos de relação água/cimento para que o concreto possa atender os requisitos de durabilidade das estruturas expostas a uma agressividade forte. Obteve-se um traço de concreto de 1: 1,06 : 1,06 : 2,87 : 0,55 (cimento: areia natural : areia artificial : brita : água) para uma resistência característica (f_{ck}) de 25 MPa. Foram moldados 76 corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, expostos as condições de incêndio e rompidos após 7 dias de cura. Para temperaturas até 300° C o concreto apresentou perdas de até 40% da resistência inicial, que aumentou para até 50% nas temperaturas até 500° C, até haver uma redução entre 80% e 90% da resistência para temperaturas de 800° C. Além disso, comprovou-se que o resfriamento brusco causa mais danos no concreto do que o resfriamento lento, porém poucas foram as variações.

Palavras-chave: Incêndio. Concreto. Resistência a altas temperaturas

ABSTRACT

The concrete is known to have a good performance against high temperatures, since it has low thermal conductivity, is non-combustible and will not release toxic gases. However, due to the heterogeneous composition of the material when exposed to situations such as fires, undergoes physical, chemical and mechanical changes that can compromise its structural integrity. Aiming to analyze the residual strength of concrete subjected to high temperatures, uniaxial compression tests on bodies - specimens submitted to different temperatures (300 °C, 500 °C and 900 °C), exposure times (30, 60 and 90 minutes) and cooling modes (slow cooling and sudden cooling). The dosage was realized in order to meet the requirements of NBR 6118 and NBR 12655, which proposed minimum values of water / cement ratio for concrete can meet the durability requirements of structures exposed to strong aggression. Afforded a concrete mix of 1 : 1.06 : 2.87 : 0.55 (cement : sand natural, artificial sand : aggregates : water) to a characteristic resistance (f_{ck}) of 25 MPa. 76 bodies of the specimen of 5 cm in diameter and 10 cm high, exposed to fire conditions and broken after 7 days of curing were molded. For temperatures up to 300 °C concrete presented losses of up to 40% of initial strength, which increased to 50% at temperatures up to 500 °C, until a reduction from 80% to 90% of the resistance to temperatures of 800 °C. Furthermore, it was shown that the sudden cooling causes more damage to the concrete than the slow cooling, but there were few variations.

Key-words: Fire. Concrete. High temperature resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mecanismos de Transmissão do Calor	16
Figura 2 – Estágios principais de um incêndio real	18
Figura 3 – Alteração na coloração e na resistência do concreto	20
Figura 4 – Redução da resistência à compressão em função do tipo de agregado adotado	23
Figura 5 – Materiais e equipamentos para a mistura do concreto	31
Figura 6 – Concreto sendo misturado na betoneira	32
Figura 7 – Forno mufla marca GP Científica	33
Figura 8 – Colocação de corpos-de-prova no forno mufla	34
Figura 9 – Equipamentos de segurança utilizados nos ensaios com forno mufla	35
Figura 10 – Corpos-de-prova resfriando sob temperatura ambiente.....	35
Figura 11 – Resfriamento brusco	36
Figura 12 – Rompimento dos corpos-de-prova	37
Figura 13 – Perda de resistência em função do aumento da temperatura.....	40
Figura 14 – Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 300°C.....	42
Figura 15 – Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 500°C.....	42
Figura 16 – Comparação entre os modos de resfriamento na temperatura de 800°C	43
Figura 17 – Capeamento sem sucesso.....	44
Figura 18 – Corpos-de-prova esbranquiçados	45
Figura 19 – Centro dos corpos-de-prova com coloração azul-acizentada	45
Figura 20 – Comparativo da integridade do concreto. À esquerda concreto que atingiu 800°C e a direita os corpos-de-prova com temperatura de até 500°C..	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Transformações sofridas por pastas de cimento durante o aquecimento.....	22
Tabela 2 – Condutividade Térmica do Concreto em função do tipo de Agregado	25
Tabela 3 – Diferentes tipos de <i>spalling</i>	28
Tabela 4 – Esquematização dos ensaios	30
Tabela 5 – Resistência à compressão do concreto ensaiado à 300°C	38
Tabela 6 – Resistência à compressão do concreto à 500°C	38
Tabela 7 – Resistência à compressão do concreto à 800°C	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS INCÊNDIOS	15
2.1 O FOGO	15
2.1.2 Transferência de calor.....	16
2.1.2.1 Condução	16
2.1.2.2 Convecção.....	17
2.1.2.3 Radiação	17
2.2 O INCÊNDIO	17
3 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	19
3.1 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NA MACROESTRUTURA DO CONCRETO	19
3.2 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO	20
3.3 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NO AGREGADO.....	22
3.4. EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO.....	24
3.5 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO	24
3.5.1 Difusividade Térmica.....	24
3.5.2 Condutividade Térmica	25
3.5.3 Calor Específico	26
3.5.4 Massa Específica	26
3.6 EFEITOS DOS MODOS DE RESFRIAMENTO NO CONCRETO	26
3.7 O <i>SPALLING</i> NO CONCRETO.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1 MATERIAIS	29

4.2 AMOSTRAS E CORPOS-DE-PROVA	29
4.3 TRAÇO DAS AMOSTRAS.....	30
4.3 MOLDAGEM E CURA	31
4.4 SIMULAÇÃO DE FOGO EM CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO ...	32
4.5 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS.....	36
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
5.1 RESULTADOS OBTIDOS	38
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39
5.2.1 Redução da resistência à compressão devido ao aumento da temperatura.....	39
5.2.2 Redução da resistência à compressão devido ao tempo de exposição às altas temperaturas.....	41
5.2.3 Redução da resistência à compressão devido à forma de resfriamento	41
5.2.4 Outros aspectos relevantes.....	43
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS	52
ANEXO 1 - CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O concreto é conhecido por ter um bom desempenho ao fogo. Do ponto de vista da segurança contra incêndios, o concreto é visto como vantajoso devido ao fato de ser incombustível, possuir baixa condutividade térmica e não exalar gases tóxicos quando submetido a altas temperaturas. Porém os danos causados no concreto podem denotar grandes perdas da sua capacidade resistente (COSTA e PIGNATTA, 2002 apud SILVA, 2009).

O concreto é um material composto por distintas fases tanto em nível macroscópico quanto em nível microscópico, que quando exposto a altas temperaturas sofre alterações físicas, químicas e mecânicas. Vários fatores influenciam o grau de alteração do concreto em altas temperaturas, como, o tempo de exposição ao fogo, a temperatura máxima atingida, a velocidade do resfriamento, o traço de concreto e o tipo de materiais que o compõem. (CÁNOVAZ, 1988; LIMA et al., 2004; SILVA, 2009).

Segundo FIGUEIREDO, COSTA E SILVA (2002 apud MORALLES, CAMPOS e FAGANELLO, 2011), a elevação gradual de temperatura provoca efeitos distintos no concreto verificando-se alteração na coloração, perda de resistência mecânica, esfarelamento superficial e fissuração até a própria desintegração da estrutura.

A composição do concreto é um dos fatores que deve ser levado em consideração, quando do estudo de concretos expostos a altas temperaturas uma vez que tanto a pasta de cimento quanto o agregado são constituídos de elementos que se alteram e se decompõem, em maior ou menor grau, com a exposição ao calor (LIMA et. al., 2004).

A umidade inicial, o tamanho da peça e a taxa de crescimento da temperatura também são influentes, uma vez que governam o desenvolvimento das pressões internas dos produtos gasosos de decomposição (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Também é de grande importância para o fenômeno de deslocamento a estrutura dos poros existente no material, visto que a estrutura típica de concretos de baixa resistência é caracterizada por uma rede ampla de poros, com diâmetros maiores, que facilita o escape do vapor de água, reduzindo a

poro-pressão. Já as microestruturas mais densas, ou com poros mais finos, dificultam a movimentação do vapor, agravando o fenômeno (LIMA et. al., 2004).

No capítulo 2 deste trabalho, faz-se considerações gerais sobre o processo que origina o fogo e as formas de transmissão que podem ocorrer num incêndio, bem como os efeitos que as altas temperaturas podem causar na macro e micro estrutura do concreto, nas propriedades térmicas e mecânicas, nos agregados e nos modos de resfriamento do concreto. Finaliza-se com as considerações acerca do fenômeno de deslocamento que ocorre no concreto durante sua exposição em altas temperaturas, chamado de *spalling*.

No capítulo 3, descreve-se a metodologia empregada no desenvolvimento da pesquisa a qual parte desde a determinação do traço, da separação de materiais, da produção dos corpos-de-prova, do tipo de cura adotada, do capeamento empregado e do ensaio de resistência à compressão.

No capítulo 4, apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios de resistência à compressão das diferentes temperaturas, tempos de exposição e modos de resfriamento adotados. Finaliza-se com uma análise dos resultados verificando a influência das altas temperaturas na resistência residual de compressão do concreto.

Finalmente no capítulo 5 faz-se as considerações finais do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a resistência residual de concretos expostos à diferentes temperaturas, tempos de exposição e modos de resfriamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Contextualizar os estudos já realizados sobre exposição de concretos em altas temperaturas.
- Determinar a resistência residual de concretos expostos à 300°C por períodos de tempo de 30 minutos, 60 minutos e 90 minutos, com resfriamento brusco e lento.
- Determinar a resistência residual de concretos expostos à 500°C por períodos de tempo de 30 minutos, 60 minutos e 90 minutos, com resfriamento brusco e lento.
- Determinar a resistência residual de concretos expostos à 800°C por períodos de tempo de 30 minutos, 60 minutos e 90 minutos, com resfriamento brusco e lento.
- Analisar visualmente o efeito que as altas temperaturas produzem na coloração do concreto e o efeito *spalling*.
- Correlacionar a perda de resistência com a evolução da temperatura, do aumento do tempo de exposição nas condições de resfriamento brusco e lento.

1.2 JUSTIFICATIVA

O concreto é um material comumente empregado na construção civil nos mais diversos tipos de estruturas. É também um dos materiais, utilizados em construção, mais complexos quimicamente e fisicamente em temperatura ambiente e ainda mais complexo quando submetido a elevadas temperaturas, como por exemplo, num incêndio.

O fato de ser um dos materiais mais utilizados no mundo exige que sejam feitas pesquisas para avaliar suas propriedades em situações peculiares e incomuns.

Deste modo o objetivo principal deste trabalho é de avaliar a influência que as altas temperaturas produzem na resistência residual de concretos usuais que são empregados na região de Pato Branco.

Há diversos aspectos que são relevantes e que interagem simultaneamente tornando a análise do comportamento do concreto exposto ao fogo complexo e não preciso.

As bibliografias relacionadas ao estudo dos materiais que compõem o concreto quando estão em situação de fogo são poucas e muitas destas são estrangeiras. Grande parte trata do assunto de forma superficial, citando separadamente o comportamento de cada material, com poucos exemplos de experiências científicas testadas. Assim este trabalho, torna-se original e viável para ser estudado e compreendido.

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS INCÊNDIOS

Todos os anos ocorrem incêndios de grande porte em indústrias, edifícios, hotéis e boates, que resultam em danos pessoais e materiais avultados. Num cenário mais recente, temos o exemplo do incêndio em Santa Maria – RS, na boate Kiss, que ocorreu no dia 27 de janeiro de 2013. A imprudência e as más condições de segurança ocasionaram a morte de 242 pessoas e grandes perdas materiais.

A natureza dos danos pode variar desde o simples manchado produzido pela fumaça, até a destruição total da edificação por combustão, ou como na maioria dos casos, pela perda de resistência dos elementos estruturais.

A perda de resistência da estrutura depende basicamente do grau de severidade do incêndio, traduzindo-se em deformações, fissurações e alterações das propriedades dos materiais que compõem a estrutura.

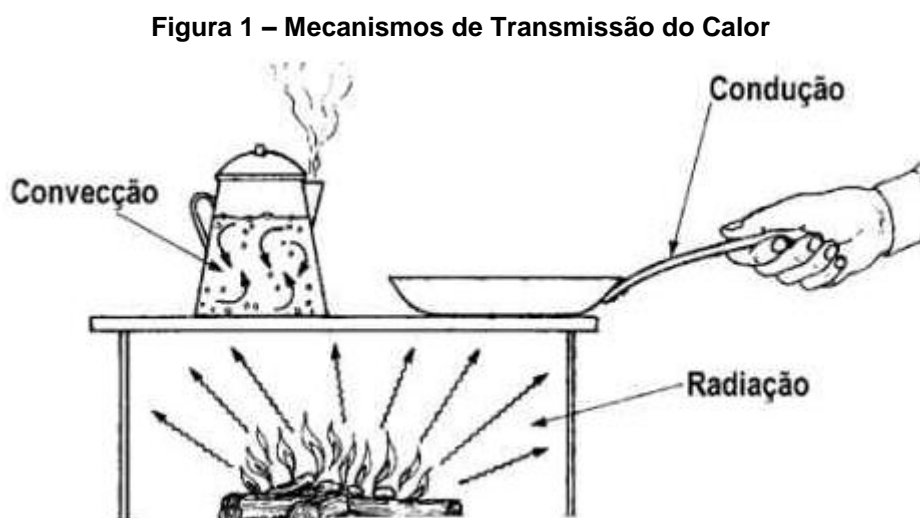
2.1 O FOGO

Segundo a NBR 13860 (ASSOCIAÇÃO..., 1997), fogo é um “processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”. Pode também ser denominado por um processo químico exotérmico de oxidação, que pode ser explicado através da teoria do Tetraedro do fogo.

O tetraedro do fogo é formado por 4 componentes, que são: o calor, o comburente, o combustível e a reação em cadeia. O calor é o elemento que dá início ao incêndio, e o comburente (oxigênio) é necessário para a combustão. O combustível serve de propagação ao fogo e a reação em cadeia torna o processo de combustão autossustentável (BRITTEZ e COSTO, 2011).

2.1.2 Transferência de calor

A transferência de calor ocorre quando dois ou mais corpos em diferentes temperaturas ficam em contato ou próximos. Há três mecanismos que fazem a transmissão do calor: Condução, Convecção e Radiação.



Fonte: Grimm (1999)

2.1.2.1 Condução

O processo da transferência de calor por condução ocorre entre meios que estejam ligados diretamente, sendo que o calor flui do meio com a temperatura mais alta para o meio com temperatura mais baixa. A capacidade que um meio tem de conduzir esse calor é denominado de condutividade térmica, e varia consideravelmente, sendo os materiais com maior valor de condutividade chamados de condutores, e os de menor valor denominados isolantes (BARROSA, 2004 e GRIMM 1999).

2.1.2.2 Convecção

A convecção é caracterizada pela transmissão do calor entre um sólido e um líquido, um gás ou um fluido. No fluido há uma grande mobilidade das partículas, sendo que estas se movimentam para os locais onde as temperaturas são mais baixas. Essa movimentação das partículas gera a transferência de energia (BARROSA, 2004).

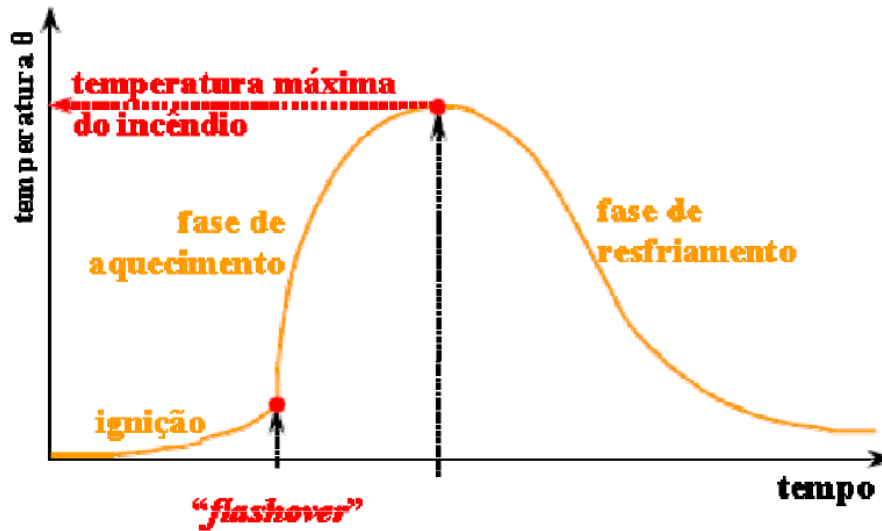
2.1.2.3 Radiação

Na radiação são as ondas eletromagnéticas que possuem a velocidade da luz que transferem o calor entre corpos separados no espaço, mesmo estando no vácuo. Ou seja, neste processo não há a necessidade de contato físico para que a energia, na forma de calor, seja transmitida. O fenômeno pode ser exemplificado com a forma da radiação solar na Terra (BARROSA, 2004 e GRIMM)

2.2 O INCÊNDIO

Um incêndio é caracterizado quando o fogo foge do controle humano. No seu desenvolvimento podem ser analisadas três fases: a ignição do fogo, a fase de aquecimento e fase de resfriamento. A figura 2 mostra a curva representativa da variação da temperatura em um incêndio, onde observa-se o rápido aquecimento após a ignição do fogo até atingir a temperatura máxima.

Figura 2 – Estágios principais de um incêndio real



Fonte: BRITEZ e COSTO, 2011

Em geral, a simulação do incêndio real é bastante complexa devido as particularidades de cada caso, e para facilitar a determinação da ação térmica nas estruturas, foram formulados modelos matemáticos que descrevem a variação da temperatura do compartimento em função do tempo do incêndio. A relação temperatura-tempo são conhecidas como curvas-padrão de incêndio (BRITEZ e COSTO, 2011).

3 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

Inúmeras alterações químicas e físicas ocorrem na pasta de cimento e nos agregados que compõem o concreto, quando este fica exposto a altas temperaturas. Devido à complexidade de se analisar o real comportamento do concreto exposto ao fogo, visto que há diversos fatores que o influenciam, são apresentados a seguir a influência das altas temperaturas sobre o concreto sob o ponto de vista macro e micro estrutural, em relação às propriedades térmicas e mecânicas e em relação aos agregados (OLIVEIRA, 2006).

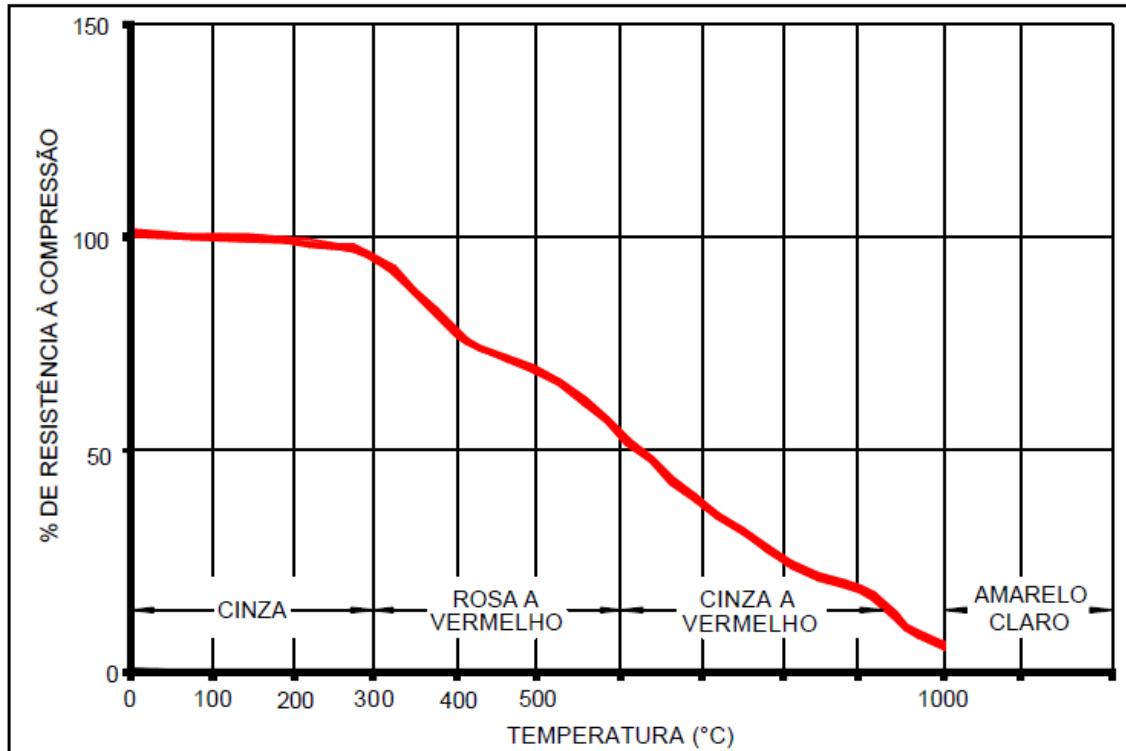
3.1 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NA MACROESTRUTURA DO CONCRETO

A primeira forma de análise do concreto que sofreu alterações de altas temperaturas é a inspeção visual, e segundo Cánovaz (1988), no processo de elevação da temperatura o concreto vai sofrendo uma série de mudanças na coloração, especialmente se os agregados são silicosos e calcários, devido à presença de componentes ferrosos nos mesmos. Porém Lima (2005) adverte que as alterações calorimétricas são mais acentuadas para os agregados ricos em sílica do que nos calcários.

Cánovaz (1988) descreve que até 200°C a cor do concreto é cinza e que não ocorrem reduções significativas de resistência. Entre 300°C à 600°C a cor muda de rosa a vermelho, baixando a resistência à compressão até valores de 50% do seu original. Acima de 600°C até 950°C a cor muda novamente para um segundo cinza com pontos avermelhados, o que indica friabilidade e alta sucção de água, sendo a resistência à compressão muito pequena. De 950°C a 1000°C a cor muda para amarelo alaranjado e o concreto começa a sintetizar-se. Entre 1000°C e 1200°C o concreto sofre sinterização, sua cor se torna amarelo claro e suas resistências são totalmente anuladas, restando só um

material calcinado e mole. A figura 3 relaciona a perda de resistência e a alteração da coloração em função do aumento da temperatura.

Figura 3 – Alteração na coloração e na resistência do concreto



Fonte: CÂNOVAZ, 1988

3.2 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

A estrutura do concreto é heterogênea e complexa e pode ser simplificada como sendo composta por partículas de rochas com formas e tamanhos variados, distribuídas por um meio ligante, constituído de uma massa contínua de pasta endurecida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Lima et. al (2004) dizem que em termos microscópicos, a estrutura do concreto é mais complexa, visto que as duas fases da estrutura não estão distribuídas homogeneamente, uma em relação à outra, nem são em si mesmas homogêneas. Podem ocorrer situações onde a pasta é extremamente

densa, comparável ao agregado graúdo, e outras, onde a pasta é extremamente porosa, prevalecendo uma estrutura com vazios capilares. A presença de agregado graúdo gera uma descontinuidade na pasta, provocando diferenças significativas na sua estrutura em regiões próximas ao mesmo. Esta interface entre a pasta de cimento e as partículas de agregado apresenta-se como uma camada delgada e é denominada de zona de transição. Geralmente, a zona de transição, por sofrer acúmulo de água, é menos resistente que as demais fases do concreto.

Em nível mais profundo, cada uma das fases é subdividida em elementos com natureza diversa. As partículas de agregado são formadas por inúmeros minerais, além de microfissuras e vazios. A matriz da pasta e a zona de transição contêm, geralmente, uma distribuição heterogênea de cristais, com diferentes tipos e quantidades de fases sólidas, poros e microfissuras (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (1994) a pasta de cimento hidratado é composta por fases sólidas, sendo as principais: silicato de cálcio hidratado, conhecida como C-S-H, corresponde de 50 a 60% do volume de sólidos; hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), chamado de portlandita, corresponde de 20 a 25% do volume de sólidos; sulfoaluminatos de cálcio, conhecido como etringita, encontrados de 15 a 20% no volume dos sólidos e grãos de clínquer não hidratados.

A pasta contém grandes quantidades de água capilar e água adsorvida, que evaporam com o aumento da temperatura e geram aumento de pressão de vapor no interior dos poros. Quando esta pressão se torna muito alta, provoca lascamentos superficiais, conhecidos como *spalling* (SOUSA, 2009). Este fenômeno será abordado no item 3.7.

Na tabela 1, CASTELLOTE et al. (2003 apud LIMA, 2005) resume as transformações sofridas por pastas de cimento durante o aquecimento.

Tabela 1 – Transformações sofridas por pastas de cimento durante o aquecimento.

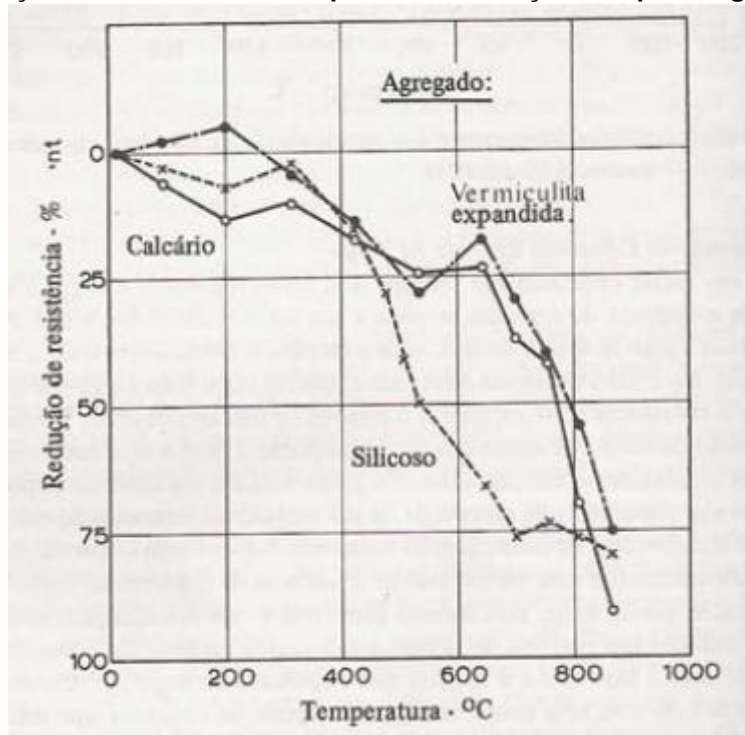
TEMPERATURA (°C)	TRANSFORMAÇÕES
20 – 80	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Marco no aumento da permeabilidade a água
80 – 200	Aumento na taxa de perda d'água capilar e fisicamente combinada
80 – 250	Perda da água quimicamente combinada
150	Pico do primeiro estágio de decomposição do C - S - H
300+	Marco no aumento da porosidade e micro-fissuras
350	Decomposição de alguns tipos de agregado de rio
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre
400 – 600	Dissociação do C - S - H em CaO e água
573	Transformação da fase α para β dos agregados quartzosos e ligeira expansão
550 - 600+	Marco no aumento dos efeitos térmicos
700+	Dissociação do CaCO_3 em CaO e CO_2 (pasta e agregados carbonáticos)
720	Segundo pico da decomposição do C - S - H em $\alpha - \text{C}_2\text{S}$ e $\beta - \text{CS}$
800	Modificação das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica
1060	Começo do derretimento de alguns constituintes

Fonte: LIMA, 2005

3.3 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NO AGREGADO

O tipo de agregado utilizado na produção do concreto influencia a perda de resistência à compressão devido a ação do fogo, porém, antes dos 500°C a diferença é desprezível (XIAO e KONIG, 2004 apud OLIVEIRA 2006). A figura 4 ilustra este comportamento.

Figura 4 – Redução da resistência à compressão em função do tipo de agregado adotado



Fonte: Neville (1997)

Essa variação da resistência à compressão que ocorre devido ao tipo de agregado utilizado é função da sua condutividade térmica. O quartzo, por exemplo, possui condutividade elevada; calcários calcíticos e dolomítico média e o basalto baixa condutividade. (NEVILLE, 1997)

Outro aspecto é a expansão súbita de volume observadas em agregados silicosos quando submetidos a altas temperaturas. Agregados calcários possuem menor diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre a matriz e o agregado, reduzindo a possibilidade do surgimento de fissuras e consequente redução da resistência. (OLIVEIRA, 2006)

Devido aos estudos mais profundos em relação à exposição do concreto ao fogo serem realizados fora do Brasil, o emprego do agregado basáltico é restrito, porém sabe-se que seu desempenho é mais favorável no uso de concretos expostos ao fogo devido as suas características.

3.4. EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Diversas variáveis interferem nos resultados de ensaios de concretos sob efeito do fogo, tais como os métodos de ensaio, a taxa de aquecimento e resfriamento, os tipos de agregados, o tamanho do corpo de prova, o tipo de cura, a temperatura máxima de exposição, a umidade do concreto, a relação água/cimento, dentre outros. Desta forma, existem amplas variações nos resultados das propriedades mecânicas apresentadas pelos estudos experimentais que dificultam uma melhor comparação e generalização dos resultados apresentados. (SOUSA, 2009)

3.5 EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS SOBRE AS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

É evidente o fato de que o concreto sofre alterações em suas propriedades térmicas quando ocorre o aumento da temperatura. Essas propriedades são consideradas importantes para dar uma estimativa da distribuição das temperaturas no concreto e são também usadas para o dimensionamento de estruturas que consideram ações térmicas.

3.5.1 Difusividade Térmica

Segundo BRITZ e COSTO (2011) a difusividade térmica é uma propriedade térmica que fornece a medida da taxa de fluxo de calor sob condições térmicas transientes e, conseqüentemente, a facilidade com que o concreto suporta as mudanças de temperatura. Ela fornece uma noção global

do comportamento térmico do material e está relacionada diretamente com o tipo de agregado empregado na dosagem do concreto.

O agregado tipo basalto, comumente empregado no Brasil, possui valor de difusividade térmica menor do que a maioria dos agregados, e consequentemente maior estabilidade térmica (FURNAS, 1997)

3.5.2 Condutividade Térmica

A condutividade térmica de um material indica a capacidade que o mesmo tem de conduzir calor, sendo que esta propriedade depende do tipo de agregado e do grau de saturação existente. Na Tabela 2 são apresentados os valores de condutividade térmica de um concreto convencional em função do tipo de agregado empregado (SOUSA, 2009).

Neville (1997) lembra que para concretos menos saturados, a condutividade é menor devido à menor capacidade da água em conduzir calor se comparado ao da pasta.

Tabela 2 – Condutividade Térmica do Concreto em função do tipo de Agregado

Tipo de agregado	Condutividade (J/m².s.C°/m)
Quartzito	3,5
Dolomito	3,3
Calcário	3,2
Arenito	2,9
Granito	2,6
Basalto	2,0
Folhelho expandido	0,5

Fonte: SOUSA, 2009.

3.5.3 Calor Específico

O calor específico é uma propriedade sensível às transformações que ocorrem no concreto em elevadas temperaturas, pois representa a capacidade do material em absorver o calor do meio externo. No concreto, essa propriedade é pouco influenciada pelos agregados já que eles possuem valores similares de calor específico ao da pasta de cimento. Porém, o valor pode variar em função do teor de umidade (SOUZA, 2009; BRITZ e COSTO, 2011).

3.5.4 Massa Específica

A massa específica do concreto varia sensivelmente durante o aumento de temperatura, devido à evaporação da água livre e do aumento do volume causado pela expansão térmica (RIPPER e SOUZA, 1998).

Como os agregados ocupam cerca 60 a 80% do volume do concreto, eles influenciam bastante na variação da massa específica conforme sua dilatação térmica.

3.6 EFEITOS DOS MODOS DE RESFRIAMENTO NO CONCRETO

A forma de resfriamento é outro fator que influencia a redução da resistência do concreto. Segundo XIAO E KONIG (2004 apud OLIVEIRA, 2006) até os 400°C o resfriamento brusco provoca perdas maiores. Isto se deve a maior quantidade de fissuras provenientes do choque térmico ao ser submerso em água. Após 600°C, a diferença torna-se insignificante.

Neville (1997) constatou que o resfriamento dentro da câmara de combustão apresentaria perdas menores de que ao ar livre, uma vez que a taxa de resfriamento seria ainda menor.

3.7 O SPALLING NO CONCRETO

As condições térmicas extremas podem provocar deslocamentos no concreto, sendo este fenômeno de “lascamento” conhecido como *spalling*.

Conforme KALIFA et. al. (2000, apud SOUSA, 2009), o *spalling* é resultado de dois principais processos independentes, que ocorrem simultaneamente no interior do concreto aquecido. O primeiro deles é conhecido por processo termo-mecânico, sendo associado ao aparecimento de tensões geradas pelos gradientes térmicos que ocorrem na estrutura. O segundo é de origem termo-hidráulica e está associada à transferência de ar, vapor e água através da rede de poros, resultando no aparecimento de gradientes de pressão no interior do concreto com subseqüentes acréscimos de pressão nos poros.

Ainda de acordo com Khoury apud Lima (2005), o *spalling* pode ser subdividido em categorias baseadas no local e na intensidade do fenômeno, que são apresentadas de forma resumida na tabela 3.

Tabela 3 – Diferentes tipos de *spalling*

<i>Spalling</i>	Tempo (min)	Natureza	Som	Dano	Influência
Agregado	7 a 30	Intenso	Estalo	Superficial	H A S D W
Cantos e quinas	30 a 90	Não violento	Nenhum	Pode ser sério	T A Ft R
Superfície	7 a 30	Violento	Estampido	Pode ser sério	H W P Ft
Resfriamento	Durante	Não violento	Nenhum	Pode ser sério	T X
Todo elemento	7 a 30	Violento	Estrondo	Sério	H A S Fs G L O P Q R S W Z

Legenda

A	Expansão térmica do agregado	P	Permeabilidade
D	Difusão térmica do agregado	Q	Seção transversal
Fs	Resistência cisalhamento do concreto	R	Armadura
Ft	Resistência a tração do concreto	S	Tamanho do agregado
G	Idade do concreto	T	Temperatura máxima
H	Taxa de aquecimento	W	Umidade
L	Carregamento/restrições	X	Re-hidratação da cal
O	Perfil do aquecimento	Z	Tamanho da seção

Fonte: LIMA, 2005.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi quantificada e avaliada a redução da resistência à compressão do concreto submetido a altas temperaturas através de uma abordagem experimental.

Para tal, foram ensaiados corpos-de-prova cilíndricos em forno mufla. Analisando-se a influência de diferentes picos de temperatura, variação de tempo de exposição e modos de esfriamento da amostra, na redução da resistência à compressão do concreto.

Nos itens a seguir são descritos os procedimentos adotados na realização do experimento.

4.1 MATERIAIS

Os materiais usados para a produção dos concretos, objeto desta pesquisa, cujas massas específicas foram determinadas por meio de ensaios em laboratório se encontram no Anexo 1, consistiam em agregados graúdos, agregados miúdos, cimento e água. O agregado graúdos é de origem basáltica denominado brita 0 (9,5 mm). Os agregados miúdos utilizados neste trabalho são divididos em duas composições granulométricas: areia natural (fina) e areia industrial (de britagem). O cimento utilizado é o cimento Portland tipo CII-Z, e a água empregada para fabricação dos concretos é a fornecida pela rede de abastecimento.

4.2 AMOSTRAS E CORPOS-DE-PROVA

Este trabalho foi planejado com uma amostra de 25 MPa, sendo composta por 76 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 5 cm x 10 cm, tendo em vista que, no Brasil, os ensaios para determinação da resistência à

compressão axial são realizados em corpos-de-prova cilíndricos. A amostra foi dividida em 3 grupos de 24 corpos-de-prova, os quais foram aquecidos nos níveis de temperatura indicados na Tabela 4. Em cada grupo as amostras foram submetidas à três tempos de exposição e para cada tempo de exposição duas formas de resfriamento.

Tabela 4 – Esquematização dos ensaios

Pico de temperatura	Tempo de exposição	Resfriamento
300° C	30 min	Lento
		Brusco
	60 min	Lento
		Brusco
	90 min	Lento
		Brusco
500° C	30 min	Lento
		Brusco
	60 min	Lento
		Brusco
	90 min	Lento
		Brusco
800° C	30 min	Lento
		Brusco
	60 min	Lento
		Brusco
	90 min	Lento
		Brusco

Fonte: Autora (2014)

4.3 TRAÇO DAS AMOSTRAS

O traço adotado neste trabalho foi obtido através parâmetros definidos por recomendações da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2003) com consistência fixada em 90 ± 10 cm. O traços unitário do concreto utilizado, em massa, foi de 1: 2,12 : 2,87 : 0,55 (cimento : areia : brita : água).

Os agregados miúdos foram utilizados na seguinte proporção: 50 % de areia natural e 50 % de areia de britagem.

4.3 MOLDAGEM E CURA

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada no dia 22 de janeiro de 2014. Com todos os materiais necessários separados e os moldes preparados com desmoldante, iniciou-se a mistura dos materiais na betoneira com capacidade para 120L, conforme observam-se nas figuras 7 e 8. Posteriormente, foram moldados os corpos-de-prova através de adensamento manual.

Figura 5 – Materiais e equipamentos para a mistura do concreto



Fonte: Autora (2014)

Figura 6 – Concreto sendo misturado na betoneira



Fonte: Autora (2014)

Após 24 horas os corpos-de-prova foram desenformados e armazenados em um tanque com água à temperatura ambiente, durante 7 dias. Após este período, os corpos-de-prova foram retirados da água e armazenados em ambiente de laboratório por aproximadamente 2 horas para posteriormente serem submetidos aos ensaios.

4.4 SIMULAÇÃO DE FOGO EM CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO

Para a simulação do fogo foi utilizado um forno mufla da marca GP Científica, como mostra a figura 9. Este equipamento está disponível no laboratório de química deste mesmo câmpus.

Figura 7 – Forno mufla marca GP Científica



Fonte: Autora (2014)

Os corpos-de-prova com idade de 7 dias foram aquecidos a 3 níveis de temperatura: 300, 500 e 800°C durante 3 períodos de tempo e 2 formas de resfriamento, a uma taxa de aquecimento de aproximadamente 5 °C/min. Embora a RILEM TC129MHT (2000) indique que a taxa de aquecimento para concreto material deve ser de 3 °C/min, neste programa experimental não foi possível adotar esta taxa devido às condições limitantes do equipamento disponível.

Em pesquisas anteriores realizadas por Anderberg (2003) e também Lima (2005), a taxa adotada foi de 27,4 °C/min, sendo esta taxa referente à taxa média de acréscimo na temperatura, prevista na curva de incêndio-padrão da ISO 834, para os primeiros 30 minutos de ensaio, porém a RILEM TC129MHT (2000) indica que esta taxa é aconselhável apenas para elementos estruturais de concreto.

Conforme já citado, os corpos-de-prova foram separados em grupos. Um desses grupos não foi submetido a altas temperaturas para serem utilizados como parâmetros de resistência inicial.

As temperaturas foram definidas com base na literatura existente sobre o assunto. Rodrigues (1994) cita que ocorrem poucas alterações na resistência do concreto até 300° C e que acima dos 800° C ocorrem perdas significativas da resistência. Portanto, foram ensaiados corpos-de-prova à temperatura de 300° C, 500° C e 800° C para determinar a perda de resistência com o aumento da temperatura.

Morales (2011) ressalta que sob resfriamento brusco o concreto apresenta perdas mais significativas de resistência. Deste modo, os ensaios foram divididos entre resfriamento brusco, com troca constante de água fria, e resfriamento lento, onde os corpos-de-prova foram retirados do forno mufla e resfriados na temperatura ambiente.

Nas figuras de 10 a 13 são apresentadas as formas de resfriamento, a colocação dos corpos-de-prova no forno mufla e os equipamentos de segurança utilizados.

Figura 8 – Colocação de corpos-de-prova no forno mufla



Fonte: Autora (2014).

Figura 9 – Equipamentos de segurança utilizados nos ensaios com forno mufla



Fonte: Autora (2014).

Figura 10 – Corpos-de-prova resfriando sob temperatura ambiente



Fonte: Autora (2014).

Figura 11 – Resfriamento brusco



Fonte: Autora (2014).

4.5 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

No dia 29 de janeiro, após exposição a altas temperaturas no forno mufla e devidamente resfriados, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre. Foram posteriormente, rompidos na prensa EMIC do laboratório de materiais de construção deste câmpus, conforme figura 14.

Figura 12 – Rompimento dos corpos-de-prova



Fonte: Autora (2014)

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 RESULTADOS OBTIDOS

As tabelas 5, 6 e 7 apresentam os valores de resistência à compressão em MPa para cada corpo-de-prova exposto em altas temperaturas, nas diversas formas de ensaio. Para cada grupo de corpos-de-prova ensaiados nas mesmas características é apresentada a média aritmética.

Os corpos-de-prova que não foram levados à mufla foram rompidos para estabelecer um parâmetro inicial de análise. A média entre eles foi de 20,87 MPa.

Tabela 5 – Resistência à compressão do concreto ensaiado à 300°C

300°C		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
30 minutos	Lento	18,88	19,15	14,28	20,02	18,08
	Brusco	11,11	14,90	19,81	16,42	15,56
60 minutos	Lento	21,90	11,61	10,00	11,82	13,83
	Brusco	15,23	9,09	12,88	13,52	12,68
90 minutos	Lento	11,18	12,05	16,22	11,45	12,73
	Brusco	9,72	12,11	14,26	10,75	11,71

Fonte: Autora (2014)

Tabela 6 – Resistência à compressão do concreto à 500°C

500°C		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
30 minutos	Lento	18,32	12,96	15,93	19,57	16,70
	Brusco	17,39	12,32	15,92	15,21	15,21
60 minutos	Lento	12,96	11,89	13,23	16,30	13,60
	Brusco	9,65	12,72	13,48	12,72	12,14
90 minutos	Lento	12,80	12,16	13,85	8,48	11,82
	Brusco	7,61	11,15	11,62	8,47	9,71

Fonte: Autora (2014)

Tabela 7 – Resistência à compressão do concreto à 800°C

800°C		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	Média
30 minutos	Lento	5,91	5,12	5,15	9,53	6,43
	Brusco	5,23	6,83	4,82	4,16	5,26
60 minutos	Lento	4,75	5,66	5,20	4,51	5,03
	Brusco	3,39	3,30	0	0	3,35
90 minutos	Lento	3,68	3,48	3,56	0	3,57
	Brusco	2,58	3,22	3,14	1,64	2,65

Fonte: Autora (2014)

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados é condição indispensável à compreensão da influência das variáveis investigadas no comportamento à compressão do concreto.

Nos itens a seguir, cada característica ensaiada será analisada separadamente.

5.2.1 Redução da resistência à compressão devido ao aumento da temperatura

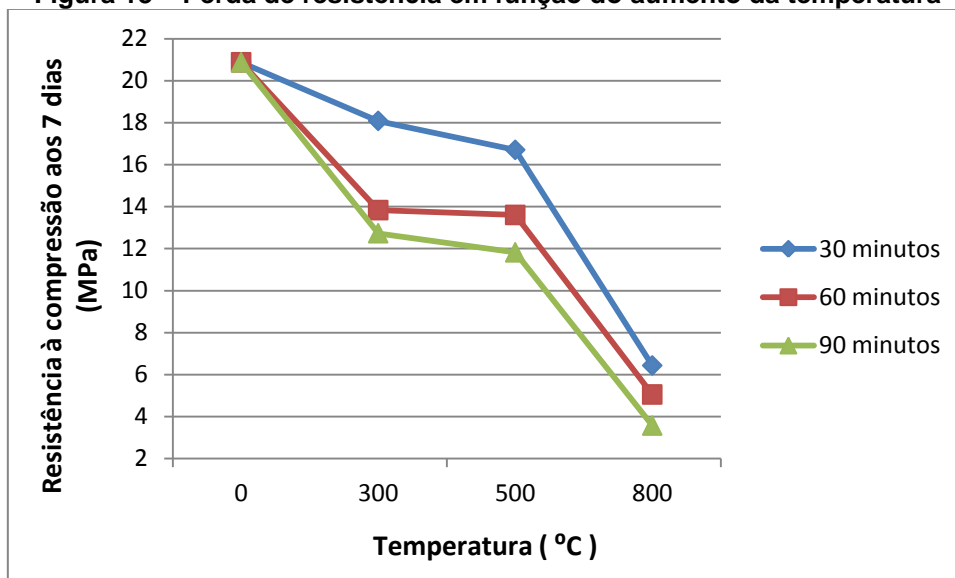
O gráfico apresentado na figura 15 demonstra a perda de resistência à compressão do concreto submetido a altas temperaturas. Pode-se notar uma perda de resistência de aproximadamente 15% para exposição de 30 minutos para temperaturas de 300° C, 30% para 60 minutos e 40% para 90 minutos, estando em desacordo com o citado por Rodrigues (1994), o qual aponta que poucas alterações ocorrem no concreto submetido a temperaturas até 300° C. Devido aos coeficientes de segurança impostos na NBR 6118 (2007) a redução observada raramente ocasionará o colapso da estrutura.

CHAN et al. (1999) obteve em suas pesquisas perda de resistência superior a 50 % para os corpos-de-prova submetidos à 400°C ou mais. Neste trabalho apenas para os corpos-de-prova submetidos à 500 por período de 90 min ou mais, tiveram este mesmo comportamento.

Observa-se ainda que a diferença da resistência entre as amostras submetidas à 300° C e à 500°C não apresentam grande variação. Uma redução mais acentuada ocorre em temperaturas após 500 °C. Conforme Castellote *et al.* (2003), neste nível de temperatura ocorre a dissociação do C-S-H em CaO e água, visto que a principal função do C-S-H é manter a pasta de cimento unida por meio de ligações químicas e das forças coesivas de Van der Waals, contribuindo satisfatoriamente para a resistência do concreto.

No último pico de temperatura ensaiado, 800°C, a perda de resistência para exposição a altas temperaturas durante 30 minutos é em torno de 70 % e para exposição de 90 minutos cerca de 80% restando na faixa de 20% da resistência inicial do concreto. SILVA (2009) obteve redução de até 93% da resistência à compressão do concreto exposto à 700°C, e resistência nula para os corpos-de-prova submetidos à 900°C.

Figura 13 – Perda de resistência em função do aumento da temperatura



Fonte: Autora (2014)

5.2.2 Redução da resistência à compressão devido ao tempo de exposição às altas temperaturas

As figuras 16, 17 e 18 representam gráficos para os diferentes picos de temperaturas ensaios em função do tempo de exposição. Pode-se observar que em todos os casos houve diminuição da resistência à compressão do concreto.

As diferenças ocorridas a cada meia hora a mais que os corpos-de-prova permaneciam na mesma temperatura chegam a ser de quase 24%.

Esses dados afirmam a necessidade da rápida intervenção nos incêndio, devido à variação da resistência que sofrem as estruturas em alguns minutos.

5.2.3 Redução da resistência à compressão devido à forma de resfriamento

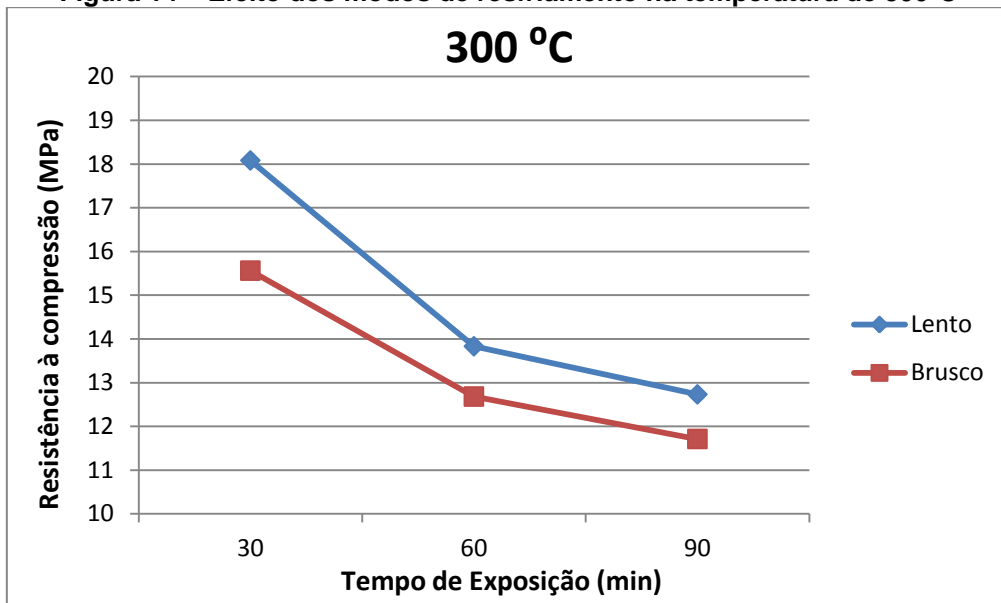
Foram utilizadas duas formas de resfriamento do concreto, devido aos estudos já relacionados no assunto que constam que o resfriamento brusco aumenta a perda de resistência à compressão do concreto.

Os gráficos das figuras 16, 17 e 18 apresentam a diminuição da resistência do concreto em função do aumento do tempo de exposição em cada pico de temperatura. Em cada figura são representadas duas linhas distintas que denotam a diferença entre os dois modos de resfriamento utilizados.

SOUSA (2009) obteve em alguns patamares de temperaturas resistência à compressão maior para os casos de resfriamento brusco do que para o resfriamento lento e cita que pode ter ocorrido uma recuperação de resistência devido a uma possível reidratação do concreto quando imerso em água. Esse fato pode ter ocorrido já que o autor deixava os corpos-de-prova imersos por 30 minutos em água para o resfriamento brusco. Neste trabalho os corpos-de-prova submetidos ao resfriamento lento ficaram em torno de 2 minutos imersos, o que não permitiria este fenômeno de reidratação.

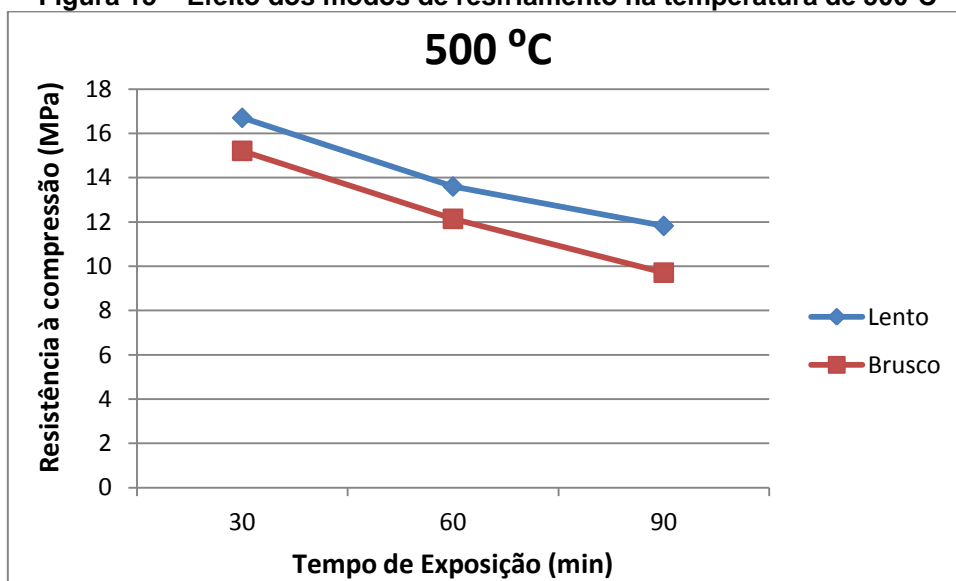
Em todos os casos o resfriamento brusco apresentou valores menores de resistência à compressão, porém as diferenças não foram em nenhum caso superior a 14%. Para MORALES, CAMPOS e FAGANELLO (2011) as diferenças chegaram a ser de até 25% entre os tipos de resfriamento, sendo o resfriamento brusco o que apresentou as menores resistências.

Figura 14 – Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 300°C



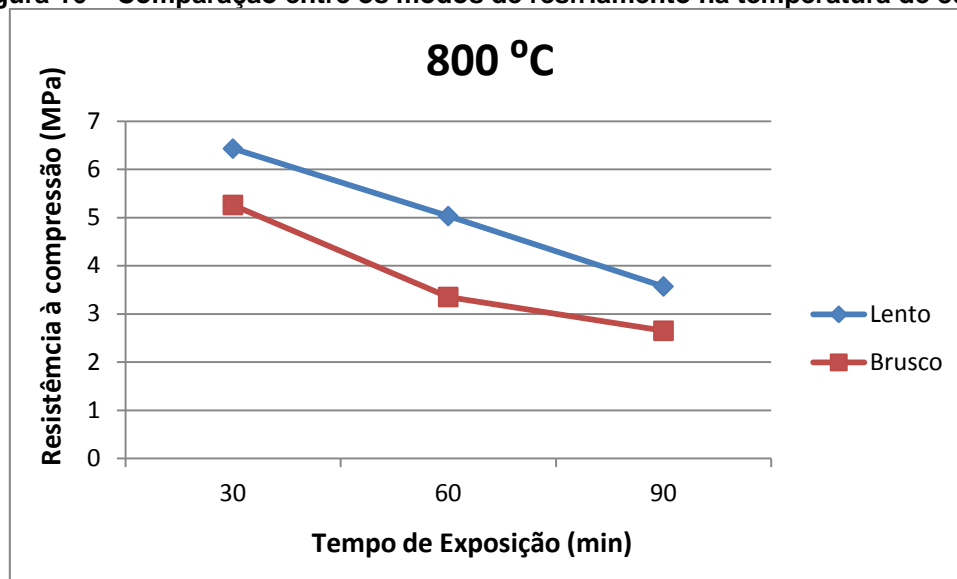
Fonte: Autora (2014)

Figura 15 – Efeito dos modos de resfriamento na temperatura de 500°C



Fonte: Autora (2014)

Figura 16 – Comparação entre os modos de resfriamento na temperatura de 800°C



Fonte: Autora (2014)

5.2.4 Outros aspectos relevantes

Os corpos-de-prova ensaiados em 800°C a partir dos 60 minutos não puderam ser capeados devido a fragilidade com que se encontravam. Foram feitas algumas tentativas de capeamento, porém sem sucesso. Os corpos-de-prova quebravam-se e esfarrelavam-se durante a retirada dos mesmos dos moldes de capeamento. A figura 15 apresenta como ficavam os corpos-de-prova na tentativa de realizar o capeamento.

Nestes casos, os corpos-de-prova foram rompidos à compressão mesmo sem o capeamento.

Figura 17 – Capeamento sem sucesso



Fonte: Autora (2014)

Em relação a coloração do concreto, foi possível verificar que os corpos-de-prova que atingiram a temperatura de 800°C ficaram mais esbranquiçados do que os outros, o que permite concluir que a descrição de Cánovaz (1988) em relação a mudança de cor do concreto conforme a temperatura de exposição, não levou em conta os diferentes tipos de materiais empregados na produção do concreto. Já os corpos-de-prova que foram resfriados bruscamente, possuíam uma cor azul-acizentada no centro. As figuras 20 e 21 confirmam estas análises.

Figura 18 – Corpos-de-prova esbranquiçados



Fonte: Autora (2014)

Figura 19 – Centro dos corpos-de-prova com coloração azul-acizentada



Fonte: Autora (2014)

Outro fato interessante observado durante os ensaios, está apresentado no figura 22. Como já visto anteriormente, quanto maior a temperatura atingida menor será a resistência à compressão. A integridade dos corpos-de-prova também é bastante afetada, o que faz com que o concreto se esfarele com facilidade, apenas com os movimentos das mãos e sem utilização de força.

Figura 20 – Comparativo da integridade do concreto. À esquerda concreto que atingiu 800°C e a direita os corpos-de-prova com temperatura de até 500°C.



Fonte: Autora (2014)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos evidenciam perdas consideráveis da resistência à compressão quando o concreto fica exposto a altas temperaturas.

Segundo a literatura, a redução da resistência em 300°C é pouco variável girando em torno de 10% da resistência inicial, mas se intensifica com o alto tempo de exposição a esta temperatura. Neste trabalho, na temperatura de 300°C para a pior situação de exposição a perda foi de quase 40%, que não parece ser muito quando comparada as perdas de mais de 87% da resistência do concreto submetido à temperatura de 800°C com o mesmo tempo de exposição.

Os diferentes tipos de resfriamento adotados (lento e brusco) exerceram poucas alterações sobre a redução da capacidade resistente do concreto. Esse resultado não era esperado, tendo por base estudos anteriores sobre o assunto que relatavam que o resfriamento brusco provocava uma maior redução da resistência em comparação ao resfriamento lento. A diferença entre os dois modos de resfriamento em poucos casos atingiu quase 14%, porém na maioria deles não chegou nem a 10%.

Durante o aquecimento não foi verificado em nenhum dos corpos-de-prova algum tipo de deslocamento explosivo. Acredita-se que a quantidade de poros existentes na matriz permitiu a migração do vapor para a superfície com relativa facilidade, reduzindo a possibilidade do spalling.

Os resultados obtidos com os ensaios ressaltam a necessidade de se aprimorar os estudos sobre o comportamento do concreto em altas temperaturas, visto que há muitas questões a serem respondidas.

Como sugestão para futuros trabalhos, a autora recomenda a utilização de corpos-de-prova com tamanhos maiores, visto que os moldes de 5x10cm apresentam grande variação entre si; utilização de outros agregados para o comparativo de melhor desempenho; produção de concretos de alta resistência, para verificar o efeito spalling que pode ocorrer devido a baixa permeabilidade dos mesmos e realização de ensaios com taxas de crescimento da temperatura controláveis, já que os equipamentos disponíveis neste campus não ofereciam tais recursos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERBERG, Y. **Thermal proprieties & analysis**. In: Course on effect of heat on concrete, 2003, Udine, Itália. International Centre for Mechanical Sciences, 2003e. 13p. Apostila.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura dos corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: materiais de pedra e agregados. Rio de Janeiro, 1993.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

BARROSA, Marcelo R. da. **Princípios fundamentais da transferência de calor**. 2004. 48 f. Trabalho (Curso de Engenharia Naval) – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Disponível em; <http://sites.poli.usp.br/p/jesse.rebello/termo/trabalho_transcal.pdf>. Acesso em 3 de Setembro de 2013.

BAUER, Falcão. **Materiais de Construção**. 5 ed revisada, v..1. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BRITEZ, Carlos Amado e COSTO, Carla Neves. Ações do fogo nas estruturas de concreto. In ISAIA, Geraldo Cechella (editor). **Concreto: ciência e tecnologia** (pp. 1029-1068). São Paulo: Ipsis gráfica e editora, 2011.

CÁNOVAZ, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CASTELLOTE, M. ET AL. **Microstructure: solid phases**. In: Course on effect of heat on concrete, Udine, Itália. 13 f. 2003.

COSTA, C.N. e PIGNATTA, V. **Estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. XXX Jornadas sul-americanas de engenharia estrutural. Concrete Research, China, v. 34, p. 1001 – 1005. Brasília, 2002.

GRIMM, Alice Marlene. **Meteorologia Básica**. Notas de aula. Universidade Federal do Paraná. 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acesso em 3 de Setembro de 2013.

FIGUEIREDO, A. D.; COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas**. In: Seminário internacional núcleo de pesquisa em tecnologia da arquitetura e urbanismo, 2002, São Paulo. Anais... São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002.

KHOURY, G. **Applications: fire & assessment**. In: Course on effect of heat on concrete, Udine, Itália. 18 f. 2003.

LIMA R. C. A., KIRCHHOF L.D., CASONATO C.A., SILVA FILHO L. C. P.. **Efeito de Altas Temperaturas no Concreto**. Artigo - Grupo de Pesquisas LEME - UFRGS. In: II Seminário de patologia das Edificações. Porto Alegre, 2004.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, SP. Ed. Pini, 1994.

MORALES Gilson; CAMPOS Alessandro; FAGANELLO Adriana M. Patriota. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. In: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, jan./mar. 2011. Londrina: UEL, 2011.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo, SP. Ed. PINI, 1997.

OLIVEIRA, Tiago A. de C. P. de. **Gerenciamento de riscos de incêndio: Avaliação do impacto em estruturas de concreto armado através de uma análise experimental de vigas isostáticas**. 2006. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 10 ed. São Paulo: Globo, 1995.

PILZ, Silvio Edmundo. **Produção de concreto: verificação da variabilidade da resistência à compressão do concreto em empresas construtoras da cidade de Chapecó**. 2006. 182 f. Trabalho de Conclusão (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

RILEM TC 129 MHT: **Test Methods for Mechanical properties of concrete at high temperatures**, Part 9: Shrinkage. 2000.

RIPPER, Thomaz; SOUSA, Vicente C. M. de. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1998.

ROCHA, J. C; XAVIER, L. L. **Materiais de construção civil**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

RODRIGUES, João Paulo Correia. **Recuperação de estruturas danificadas por incêndio**. 1994. 214 f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1994.

SILVA, Daiane dos Santos da. **Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis**. 2009. 102 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Programa de

Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SOUSA, Moisés M, de. **Estudo experimental do comportamento mecânico e da microestrutura de um concreto convencional após simulação das condições de incêndio**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

XIAO, J e KONIG,G. **Study on concrete at high temperature in China – on overview**. Fire Safety Journal. China, 2004.

ANEXOS

ANEXO 1 - CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

1.1 AREIA NATURAL E AREIA ARTIFICIAL

1.1.1 Massa específica aparente

A determinação da massa específica aparente tanto para areia natural quanto para areia artificial se deu pelo método do picnômetro. Esse consiste num recipiente com tampa esmerilhada (figura 5), o qual apresenta um volume bem preciso quando preenchido com água.

Inicialmente, mediu-se a massa do picnômetro preenchido com água (P_{ag}) e a massa da amostra de areia (m). Em seguida, retirou-se a água do picnômetro para colocação da areia e completou-se novamente o recipiente com água. E por fim mediu-se a massa do conjunto ($P_{ag}+m$).

A massa específica aparente da areia foi determinada, através da equação (1).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{P_{ag} - [(P_{ag} + m) - m]} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} : massa específica aparente da areia

P_{ag} : massa do picnômetro + água

m : massa de areia

Figura 1 - Picnômetro



Fonte: Autora (2014)

Na tabela 1 observam-se os valores obtidos para massa específica aparente da areia natural e artificial. Conforme esperado, notam-se pequenas oscilações nos resultados obtidos através do método proposto.

Tabela 1 - Massa específica aparente da areia

	P_{ag} (g)	m (g)	P_{ag+m} (g)	ρ_{ap} (g/cm ³)
Areia Artificial				
Amostra 1	78,31	6,02	82,22	2,85
Amostra 2	78,38	9,47	84,54	2,86
Amostra 3	78,24	6,13	82,22	2,85
			Média	2,85
Areia Natural				
Amostra 1	78,25	6,90	82,54	2,64
Amostra 2	78,33	6,45	82,33	2,63
Amostra 3	78,29	6,39	82,24	2,62
			Média	2,63

Fonte: Autora (2014).

A partir da média aritmética obteve-se a massa específica aparente para as areias, sendo de 2,63 g/cm³ para areia natural e de 2,85 g/cm³ para areia artificial.

1.2 BRITA

1.2.1 Massa específica aparente

Determinou-se a massa específica aparente da brita com base no método do frasco graduado. Neste método inicialmente foi medido 250 ml de água (L_i) contida no frasco graduado. Após isso, pesou-se certa quantidade de brita (m) para em seguida ser colocada também dentro do frasco graduado. Ao final foi feita uma nova leitura da medida no frasco contendo água e brita (L_f) e calculada a massa específica aparente da brita. O processo foi repetido, mas desta vez, mediu-se 150 ml de água (L_i). A equação (2) foi utilizada para determinar a massa específica aparente.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{L_f - L_i} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} : massa específica aparente da brita

L_i : volume inicial

L_f : volume final

Os dados referentes ao ensaio de massa específica aparente da brita são apresentados na tabela 2. Nota-se que o valor médio obtido foi de 2,83 g/ml, em unidades usuais, 2,83 g/cm³.

Tabela 2 – Massa específica aparente da brita

	L_i (ml)	m (g)	L_f (ml)	d (g/ml)
Amostra 1	250,00	199,50	320,00	2,85
Amostra 2	150,00	98,20	185,00	2,81
			Média	2,83

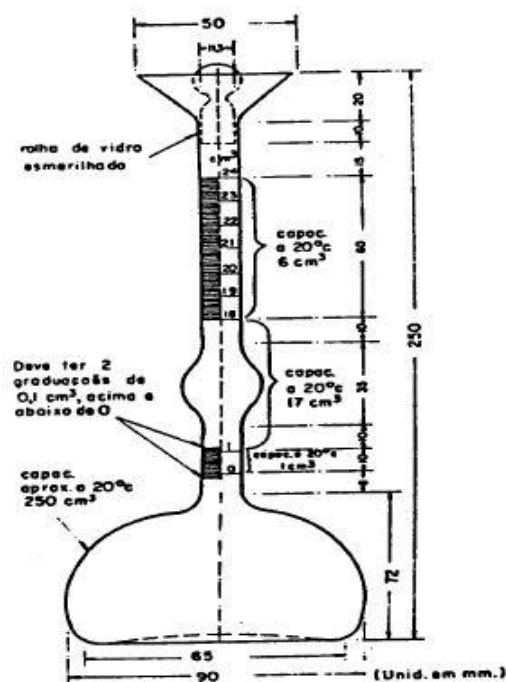
Fonte: Autora (2014).

1.3 CIMENTO

1.3.1 Massa específica aparente

De acordo com NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO..., 2001), a massa específica aparente do cimento é obtida através da determinação do volume deslocado por uma massa (m) de cimento conhecida (aproximadamente 50 g), utilizando-se o frasco de Le Chatelier (figura 2).

Figura 2 – Frasco de Le Chatelier



Fonte: PETRUCCI (1995).

Neste experimento o líquido utilizado para a determinação do volume é a querosene, visto que esse não reage com o cimento. Inicialmente, colocou-se querosene no frasco de Le Chatelier (Figura 2) até atingir altura intermediária (Li), e com o auxílio de um funil foi adicionado o cimento, fazendo-se a leitura final (Lf). Por meio da equação (2) pode-se então determinar sua massa específica aparente.

A massa específica aparente segundo Bauer (2008) é de 3,15 g/cm³. Na tabela 6 são apresentados os valores obtidos para a massa específica aparente do cimento utilizado, cimento CP II Z 32. Através do método do frasco de Le Chatelier obteve-se um valor de 3,15 g/cm³ estando de acordo com o citado na bibliografia.

Tabela 3 - Massa específica aparente do cimento

Cimento (g)	Leitura inicial (ml)	Leitura final (ml)	ρ_{ap} (g/cm ³)
60	2,66	21,7	3,15

Fonte: Autora (2014)