

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Bruno Ricardo Biazetto

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA POROSIDADE E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO
SUBMETIDO À FADIGA TÉRMICA**

Avaliador:

Defesa: dia __/__/2018 às _____ horas

Local: LEME / Campus do Vale
Av. Bento Gonçalves, 9500, Auditório

**Anotações com sugestões para
qualificar o trabalho são bem-
vindas. O aluno fará as correções e
lhe passará a versão final do
trabalho, se for de seu interesse.**

Porto Alegre
janeiro 2018

BRUNO RICARDO BIAZETTO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA POROSIDADE E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO
SUBMETIDO À FADIGA TÉRMICA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Porto Alegre
janeiro 2018

BRUNO RICARDO BIAZETTO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA POROSIDADE E DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO
SUBMETIDO À FADIGA TÉRMICA**

Porto Alegre, janeiro de 2018

Prof. Ângela Gaio Graeff
PhD pela University of Sheffield/UK
Orientador

Prof. Jacinto Manuel Antunes de Almeida
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela University of Sheffield/UK

Prof. Jacinto Manuel Antunes de Almeida (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Vanessa Pasa Dutra (UFRGS)
Dra. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Alexandre Lorenzi (UFRGS)
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos Professores Ângela Gaio Graeff, orientadora deste trabalho, e Jacinto Manuel Antunes de Almeida, coorientador deste trabalho, pelas conversas sempre construtivas, conselhos e aprendizados que me proporcionaram neste ano.

Agradeço a toda equipe do LEME (Laboratório de Ensaaios e Modelos Estruturais) da UFRGS, tanto professores, bolsistas, técnicos e servidores, pelo apoio e acolhimento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, por todas as oportunidades que me proporcionaram, que mesmo quando longe me apoiavam durante meu caminho.

Agradeço a todos os professores que tive durante minha vida, que me incentivaram a desenvolver um pensamento crítico, me encorajando a pensar e não apenas repassaram conhecimentos pré-estabelecidos.

Agradeço ao Governo Brasileiro, que apesar de tantas irregularidades e injustiças, me ofereceu um ensino superior de grande nível, sem custos.

Agradeço a todos meus amigos, que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento, intelectual e pessoal, e sempre estiveram ao meu lado nesta jornada. Sou uma pessoa melhor graças a cada um de vocês.

A mente é um lugar em si mesma e pode
fazer do inferno um paraíso ou do
paraíso um inferno

John Milton

RESUMO

O concreto é um material utilizado amplamente na construção civil, sendo assim, diversos estudos sobre o comportamento deste material podem ser encontrados. Entretanto no que diz respeito ao seu comportamento quanto à variação térmica, pouca informação pode ser encontrada principalmente pelo fato do concreto possuir baixa condutividade térmica, e os efeitos da variação de temperatura acabam sendo geralmente desconsiderados. Contudo, algumas estruturas sofrem os efeitos da oscilação térmica de maneira mais acentuada, tais como chaminés, pisos industriais, algumas tubulações, dentre outros. Em função da necessidade de informação sobre as propriedades do concreto quando exposto a este tipo de ambiente, este trabalho objetiva avaliar a interferência dos ciclos térmicos em elementos de concreto, assim, melhor descrevendo a influência da oscilação térmica em termos de porosidade, resistência à compressão e tração. Para melhor analisar este comportamento foram moldados corpos de prova de resistência à compressão comumente utilizada na construção civil os quais foram submetidos a 30 e 60 ciclos de aquecimento e resfriamento em patamar de 200°C, apresentando queda considerável na resistência mecânica bem como um aumento na porosidade. Este trabalho demonstra assim que, mesmo em variações de temperaturas relativamente baixas, a oscilação térmica funciona como agente de deterioração de elementos de concreto.

Palavras-chave: Concreto, Fadiga Térmica, Variação Térmica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa.....	16
Figura 2 – Evolução da intensidade normalizada durante o aquecimento – maior teor de C3A e alto teor alcalino.....	21
Figura 3 – Evolução da intensidade normalizada durante o aquecimento – menor teor de C3A e baixo teor alcalino.....	21
Figura 4 – Evolução da resistência dos agregados frente altas temperaturas.....	23
Figura 5 – Manifestação de <i>spalling</i> em uma estrutura após incêndio.....	25
Figura 6 – Gráfico solicitação x tempo dos tipos de ciclos que geram fadiga.	27
Figura 7 – Gráfico ciclos x resistência á compressão.....	29
Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo..	32
Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado fino.	33
Figura 10 – Corpo de prova durante ensaio de resistência à compressão.	35
Figura 11 – Corpo de prova durante ensaio de compressão diametral.....	35
Figura 12 – Corpo de prova durante ensaio de propagação de pulso ultrassônico.....	36
Figura 13 – Evolução do índice de vazios e absorção de água durante os ciclos.....	37
Figura 14 – Evolução da resistência à compressão durante os ciclos.	39
Figura 15 – Comparativo de resultados entre o autor e Chandramouli et al. (2006).....	40
Figura 16 – Evolução da resistência à compressão diametral durante os ciclos.	40
Figura 17 – Evolução da VPU.....	42
Figura 18 – Comparativo VPU x Resistência à compressão.	42
Figura 19 – Comparativo Porosidade x Resistência à compressão.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Alterações colorimétricas do concreto.	20
Tabela 2 – Coeficientes de dilatação para agregados rochosos.....	23
Tabela 3 – Alterações colorimétricas no concreto.....	25
Tabela 4 – Características físico químicas do cimento utilizado.	31
Tabela 5 – Resultados para os ensaios de absorção de água e índice de vazios.....	37
Tabela 6 – Teste Anova One-Way para o ensaio de absorção de água.	38
Tabela 7 – Teste Anova One-Way para o ensaio de índice de vazios.....	38
Tabela 8 – Resultados para os ensaios de absorção de resistência à compressão.	39
Tabela 9 – Teste Anova One-Way para o ensaio de resistência a compressão.	39
Tabela 10 – Resultados para os ensaios de absorção de resistência à compressão diametral. .	40
Tabela 11 – Teste Anova One-Way para o ensaio de resistência a compressão diametral.	41
Tabela 12 – Resultados para os ensaios de VPU.....	41
Tabela 13 – Teste Anova One-Way para o ensaio de VPU.....	42

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C-H-S – Silicato de Cálcio Hidratado

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

NBR – Norma Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VPU – Velocidade de Propagação de Pulso Ultrassônico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.2.1 Objetivo principal.....	14
2.2.2 Objetivos secundários	14
2.3 HIPÓTESE	15
2.4 PRESSUPOSTO	15
2.5 PREMISA.....	15
2.6 DELIMITAÇÕES.....	15
2.7 LIMITAÇÕES	16
2.8 DELINEAMENTO.....	16
3 CONCRETO E AS ALTAS TEMPERATURAS	18
3.1 EFEITOS MICROESTRUTURAIS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	18
3.2 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NA PASTA DE CIMENTO	19
3.3 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NOS AGREGADOS.....	22
3.4 EFEITOS MACROESTRUTURAIS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	24
3.5 <i>SPALLING</i>	25
3.6 FADIGA TÉRMICA	26
3.7 FADIGA TÉRMICA EM ELEMENTOS DE CONCRETO	28
4 MÉTODO DE PESQUISA	31
4.1 MATERIAIS	31
4.1.1 Cimento	31
4.1.2 Agregado graúdo	32
4.1.2 Agregado miúdo.....	32
4.2 TRAÇO, MISTURA E TRATAMENTO DOS CORPOS DE PROVA	33
4.2.2 Traço	33
4.2.2 Ciclos.....	33
4.3 MÉTODOS DE ENSAIO	33
4.3.1 Absorção de água e índice de vazios	34
4.3.2 Resistência à compressão	34
4.3.3 Compressão diametral	35

4.3.4 Velocidade de propagação de pulso ultrassônico	35
5 RESULTADOS E TRATAMENTO DE DADOS.....	37
5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS	37
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	38
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL	41
5.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE PULSO ULTRASSÔNICO	42
5.5 COMPARATIVO ENTRE PROPRIEDADES	44
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
6.1 CONCLUSÕES.....	46
6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	47

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de fadiga é definido como o processo de falha por ciclos repetitivos de aplicação de solicitações. Este parâmetro é de extrema importância uma vez que grande parte das falhas de materiais em serviço ocorre por fadiga. No caso da fadiga térmica, a solicitação a qual o material é submetido se dá pela variação volumétrica gerada pela oscilação térmica. O fenômeno de fadiga térmica é amplamente estudado e descrito em materiais metálicos, uma vez que estes possuem uma maior condutividade térmica, assim dilatando de maneira mais abrupta conforme a variação térmica, conseqüentemente sofrendo maiores solicitações. Em materiais cerâmicos, este fenômeno é muitas vezes ignorado devido ao baixo coeficiente de dilatação destes materiais.

Na construção civil a fadiga térmica é estudada com mais detalhe na confecção de pavimentos, devido a sua exposição prolongada à variação térmica ambiente. Porém não são só pavimentos que estão sujeitos a esta variação. Muitas estruturas de concreto são submetidas a gradientes de temperatura sem a devida consideração dos efeitos de fadiga térmica, tais como as chaminés, lajes industriais e tubulações de concreto.

Para minimizar as ações térmicas sobre a estrutura, muitas vezes se faz uso de materiais refratários, porém esta prática não é regulamentada, sendo muitas vezes escolhida com base em recomendações de fabricantes. Geralmente a utilização de materiais refratários é recomendada para estruturas em temperatura de serviço superiores a 200°C, desta forma comum à utilização de concreto convencional em estruturas submetidas a temperaturas relativamente elevadas, mesmo que abaixo dos 200°C.

Em função desta carência de informação sobre a resistência do concreto a estes ciclos, este trabalho visa analisar a variação de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) e porosidade, de corpos de prova moldados em concreto e submetidos a ciclos de variação térmica.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a influência dos ciclos de variação térmica na resistência à compressão, tração, velocidade de propagação de pulso ultrassônico e porosidade do concreto?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar os efeitos da ciclagem térmica em corpos de prova de concreto, em termos de resistência à compressão, resistência à tração, velocidade de propagação de pulso ultrassônico e porosidade.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário deste projeto é discriminar o fenômeno de fadiga térmica e como o mesmo interfere nas propriedades mecânicas do concreto.

2.3 HIPÓTESE

Tem-se como hipótese da pesquisa que a ciclagem térmica irá reduzir a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral. Com relação à porosidade, acredita-se que haverá um aumento proporcional aos ocorridos nos ensaios de resistência à compressão e tração.

2.4 PRESSUPOSTO

Parte-se do pressuposto de que os efeitos verificados durante os ensaios com corpos de prova de concreto, em laboratório, podem ser correlacionados, considerando as devidas proporções, aos eventos de fadiga térmica presentes em estruturas reais, tais como chaminés pisos industriais e pavimentos.

2.5 PREMISSE

Estruturas de concreto são vastamente utilizadas em edificações com as mais variadas aplicações. Neste contexto a estrutura pode ser submetida a uma série de efeitos, dentre eles a fadiga térmica. Devido à baixa condutividade térmica do concreto, este efeito é normalmente desprezado, porém algumas estruturas sofrem ciclos térmicos de maneira mais acentuada que outras, como por exemplo, chaminés, lajes expostas ao clima ou a maquinário pesado, etc. Nestes casos a ciclagem térmica tem uma influência relevante no comportamento do concreto. Entretanto, não há normatização ou métodos que permitam a inclusão dos efeitos de fadiga térmica ao dimensionamento da estrutura tanto nacionalmente quanto internacionalmente.

2.6 DELIMITAÇÕES

Este trabalho delimita-se à análise dos efeitos de ciclagem térmica em corpos de prova cilíndricos de concreto de resistência média à compressão de 40 MPa, submetidos a 30 e 60 ciclos de aquecimento à temperatura de 200⁰C. Estes efeitos somente foram avaliados em

quesitos de índice de vazios, absorção de água, VPU, resistência a compressão e compressão diametral

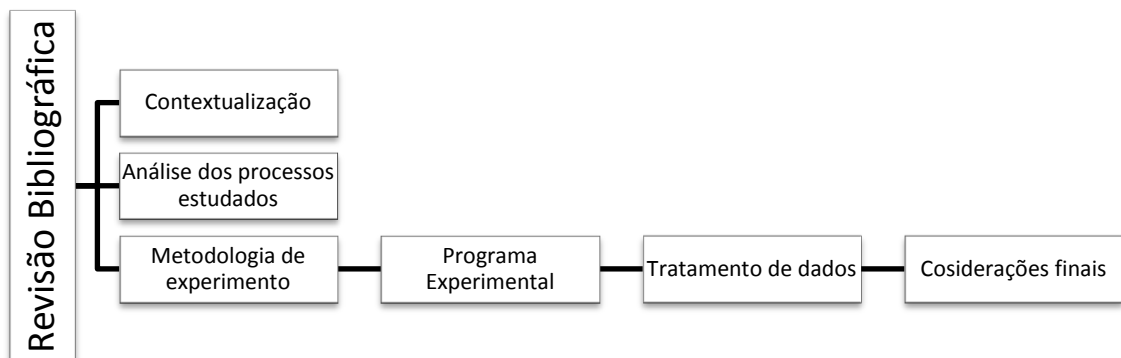
2.7 LIMITAÇÕES

Considerando a análise experimental, foi avaliada apenas uma temperatura máxima para a ciclagem térmica, com ciclos pré-definidos, bem como, apenas dois períodos de ciclagem térmica, e somente uma resistência de concreto, conforme exposto nas delimitações do trabalho. Esta limitação se deve devido a capacidade operacional dos equipamentos utilizados bem como o tempo disponível para a realização do trabalho.

2.8 DELINEAMENTO

Para o desenvolvimento do trabalho foram executadas as seguintes etapas, apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor).

A pesquisa bibliográfica foi elaborada com a finalidade de embasar as informações, decisões metodológicas e resultados obtidos durante o trabalho. Seu desenvolvimento ocorreu concomitante ao andamento do trabalho, do início ao término do mesmo.

A contextualização sobre o efeito da temperatura nas propriedades do concreto se deu com base na revisão bibliográfica, visando elucidar sobre o comportamento do concreto frente a variações de temperatura.

A metodologia foi baseada nos levantamentos da revisão bibliográfica, tendo por finalidade mostrar e justificar as decisões tomadas na definição do programa experimental.

No programa experimental realizaram-se os experimentos considerando os parâmetros definidos na metodologia.

Com relação à análise e tratamento de dados, partiu-se das informações obtidas nos experimentos, e foi analisada a influência do processo de ciclagem térmica nas propriedades mecânicas do concreto e na porosidade.

A etapa de considerações finais foi aquela em que os dados tratados foram analisados e apresentados no intuito de definir com clareza de maneira qualitativa e quantitativa a influência da ciclagem térmica nas propriedades do concreto.

3 CONCRETO E AS ALTAS TEMPERATURAS

O concreto é um material conhecido por possuir bom desempenho frente a altas temperaturas. As características que se sobressaem são o fato de ser incombustível, ter condutividade térmica baixa e não produzir gases tóxicos quando submetido a altas temperaturas (COSTA e PIGNATTA, 2002 apud SILVA, 2009).

Porém o aumento de temperatura causa diversas alterações químicas e físicas na pasta de cimento e agregados que compõe o concreto. Esta natureza polifásica do concreto gera uma degradação diferencial em seus componentes, afetando as propriedades mecânicas por meio da redução na resistência e no módulo de elasticidade (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002).

3.1 EFEITOS MICROESTRUTURAIS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

Lima et al. (2004) sugerem que a maioria dos efeitos micro estruturais do concreto submetido ao aumento de temperatura provém da poro pressão gerada pela evaporação da água livre e capilar presente no concreto. Este efeito não é tão intenso em concreto com alto grau de porosidade, pois a mesma propicia o alívio destas tensões geradas. Concretos com baixa porosidade não aliviam de maneira eficiente as pressões geradas pela evaporação, assim gerando um sistema de tensões internas no elemento. Neste contexto a zona de transição entre pasta e agregado sofre severos danos, por ser uma zona de menor resistência e maior facilidade de desidratação da pasta, propiciando a formação de trincas na mesma. Outro fator importante a ser levado em consideração é a deformação diferencial entre pasta e agregado, a qual em temperaturas elevadas gera fortes tensões na zona de transição, agravando a fissuração da mesma.

Além disso, destaca-se o fato de que durante o aquecimento do concreto, os diversos tipos de água presente na estrutura, água livre, água capilar, água interlamelar (água de gel), água adsorvida e água de cristalização, começam a ser perdidos através de reações físicas e químicas. A presença de grandes quantidades de água, juntamente a baixa permeabilidade da pasta de cimento, pode acarretar em danos durante o aquecimento do concreto. Uma destas manifestações patológicas é o lascamento superficial da estrutura, o qual ocorre quando a

pressão de vapor dentro do material cresce em uma taxa maior que o alívio de pressões do mesmo (METHA; MONTEIRO, 2014).

3.2 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NA PASTA DE CIMENTO

A pasta de cimento é composta por fases sólidas, sendo suas principais: silicato de cálcio hidratado, conhecida como C-S-H, correspondente a 50 a 60% do volume de sólidos; hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), chamado de portlandita, correspondente a 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 (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estas fases sofrem influência direta do aumento de temperatura. Por exemplo, o gel C-S-H começa a sofrer desidratação em temperaturas superiores a 100°C , retardando o aquecimento do concreto. No patamar entre 300°C e 400°C a desidratação dos silicatos de cálcio se conclui gerando silicatos anidros. Este processo se resulta em uma série de alterações na estrutura do concreto, e conseqüentemente, em um decréscimo na resistência do mesmo (LIMA et al, 2004).

A portlandita é outro mineral que sofre uma série de transformações durante o aquecimento, sua quantidade cai bruscamente até a temperatura de 100°C , devido a desidratação da mesma, na temperatura de 530°C , este material começa o processo de decomposição gerando como produto óxido de cálcio (CaO). Este composto possui volume inferior a seu estado original. A portlandita, na presença de água se re-hidrata, retornando a sua composição original. Este ciclo de transformações gera tensões no concreto por meio das variações volumétricas por ele geradas, além da portlandita formada por re-hidratação possuir arranjo cristalino menos estável, e reiniciar o ciclo de reações com menor energia de ativação, ou seja, menores temperaturas (ALONSO et al, 2003). A tabela 1 mostra de forma reduzida as alterações físico químicas que se desenvolvem na pasta de cimento durante a elevação da temperatura.

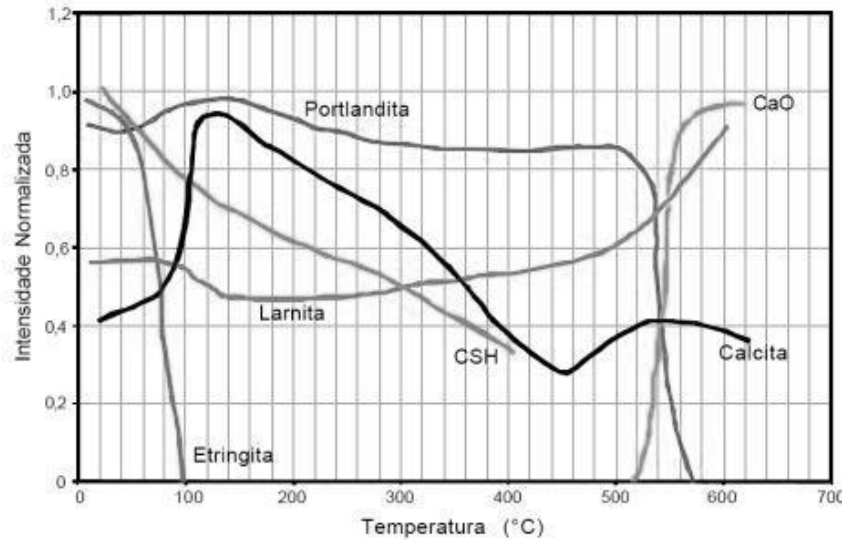
Tabela 1 - Alterações físico químicas da pasta de cimento.

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 do 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 de 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)

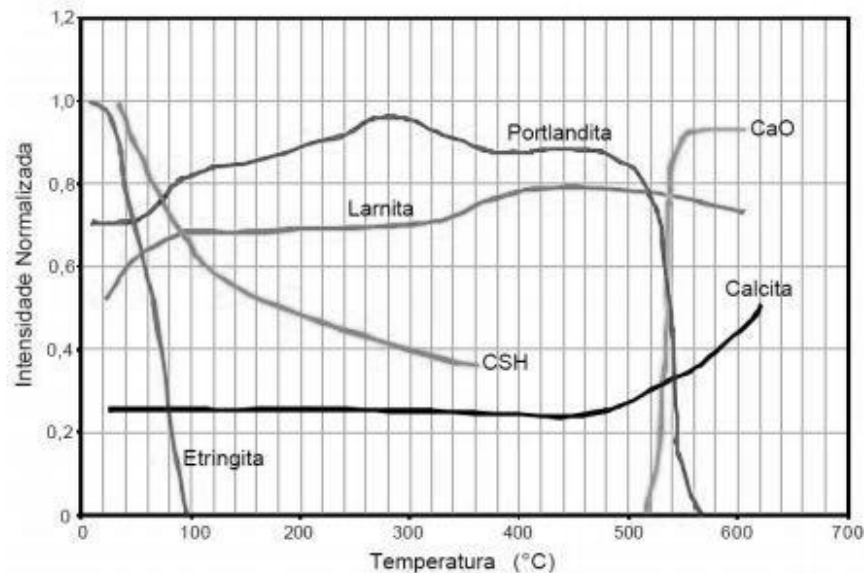
Estudos realizados nas alterações pasta de cimento quando submetido a altas temperaturas demonstram através de análises de difração de nêutrons, a alteração das seis fases cristalinas principais do concreto (portlandita, etringita, calcita, óxido de cálcio, C-S-H gel e larnita). As figuras 2 e 3 mostram, respectivamente, as alterações até 620⁰C de pastas de cimento com alto teor de C₃A (>9%) e alto teor alcalino (>0,84% Na₂O) e baixo teor de C₃A (<1%) e baixo teor alcalino (>0,84% Na₂O) (CASTELLOTE et al., 2004).

Figura 2– Evolução da intensidade normalizada durante o aquecimento – maior teor de C₃A e alto teor alcalino.



(fonte:CASTELLOTE et al., 2004)

Figura 3 - Evolução da intensidade normalizada durante o aquecimento – menor teor de C₃A e baixo teor alcalino.



(fonte:CASTELLOTE et al., 2004)

Almeida (2017) registra, em ensaios conduzidos no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS, que em temperaturas até 200°C, a redução da resistência do concreto

se dá principalmente devido à evaporação da água contida nos poros capilares, à decomposição dos aluminatos hidratados e ao início da decomposição do gel de C-S-H. Para temperaturas até 400°C a redução de resistência se dá devido à evaporação da água liberada pela desidratação do gel C-S-H, ao aumento da porosidade e da micro fissuração decorrente da retração térmica. Em temperaturas entre 400°C e 600°C, análises de difração de raios-X apontaram a desidroxilação da portlandita, com liberação de sais básicos de CaO. A reidratação do CaO gera novos cristais de portlandita de maior volume e estrutura cristalina mais frágil, gerando um aumento na fissuração devido à expansão volumétrica.

Além da resistência, o módulo de elasticidade do concreto é diretamente influenciado pela variação térmica, e a redução do módulo com a ação das altas temperaturas está associada ao aumento de porosidade e da micro fissuração. Na temperatura de 600°C pode-se verificar uma degradação acentuada do módulo devido à expansão dos agregados, principalmente silicosos, agravando a micro fissuração na zona de transição (ALMEIDA, 2017).

Apesar de todas as alterações químicas ocorridas na pasta de cimento quando submetida a altas temperaturas e da consequente redução na resistência, uma parte dos compostos desidratados tem a capacidade de se reidratar após o resfriamento do concreto, assim recuperando parcialmente a resistência. Nos experimentos de Almeida (2017) o processo de reidratação em ambiente controlado do concreto convencional com CPV-ARI, exposto a 600°C e resfriado com imersão em água durante duas horas, provocou uma recuperação de aproximadamente 50% da resistência residual nos primeiros sete dias, estabilizando após esse período.

3.3 EFEITOS DAS ALTAS TEMPERATURAS NOS AGREGADOS

Segundo Neville e Brooks (2010), aproximadamente três quartos do volume do concreto é ocupado pelos agregados, assim sendo sua qualidade e propriedades são de considerável importância. No âmbito térmico três características dos agregados são de direta influência no desempenho do concreto, sendo elas o coeficiente de dilatação, o calor específico e a condutividade térmica. As duas últimas características, usualmente não tem grande relevância na confecção de concretos estruturais, no entanto o coeficiente de dilatação do agregado, quando difere do coeficiente da pasta de concreto, tende a gerar tensões internas propiciando a formação de trincas.

Ainda segundo Neville e Brooks (2010), quando os coeficientes de dilatação da pasta de cimento e do agregado diferem por mais de $5.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, a durabilidade do concreto é bastante afetada, principalmente para variações térmicas superiores a 60°C . O coeficiente de dilatação da pasta de cimento geralmente apresenta valores entre 11 e $16 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. A Tabela 2 apresenta os coeficientes de dilatação para os agregados rochosos mais amplamente utilizados na produção de concreto.

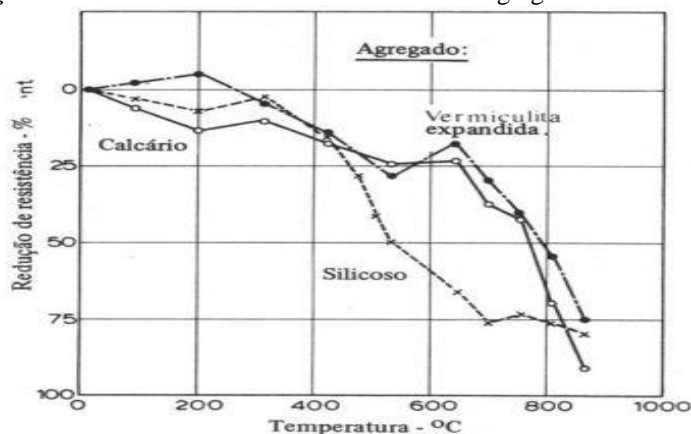
Tabela 2 – Coeficientes de dilatação para agregados rochosos.

Tipo de Rocha	Coefficiente de Expansão Linear ($10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
Granito	1,8 a 11,9
Basalto	3,6 a 9,7
Arenito	4,3 a 13,9
Calcário	0,9 a 12,2
Mármore	1,1 a 16,0

(fonte: NEVILLE e BROOKS, 2010).

Para temperaturas superiores a 430°C , a resistência de concretos moldados com agregados silicosos, tem uma maior perda em relação aos moldados com agregados calcários ou leves, entretanto esta diferença não é significativa para temperaturas superiores a 800°C . A Figura 4 mostra a queda de resistência à compressão de concretos de resistência inicial de 28MPa , conforme se eleva a temperatura. De maneira geral, pode-se estabelecer a temperatura de 600°C como a temperatura limite de integridade estrutural para concretos de cimento Portland (NEVILLE, 1997).

Figura 4 – Evolução da resistência do concreto com diferentes agregados frente altas temperaturas.



(fonte:NEVILLE, 1997).

Além dos agregados, as adições no concreto também têm grande influência na resistência residual do concreto. Lima (2005) analisa a influência tanto do agregado quanto de adições minerais no comportamento do concreto submetido a altas temperaturas. Utilizando uma taxa de aquecimento de $27,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e patamares de exposição de 30 minutos, concretos moldados com adições de 5% e 10% de meta caulim e sílica ativa e agregados graníticos e basálticos são submetidos às temperaturas de 200°C , 400°C , 600°C e 900°C , observando-se resultados de resistência residual à compressão bastante variados. Na temperatura de 600°C a resistência do concreto com agregado basáltico e 5% de adição mineral, tanto sílica ativa como meta caulim, obtiveram resistências maiores que aos expostos a 400°C . O concreto com agregado basáltico e 10% de adição de meta caulim obteve resistência comparativa superior aos 400°C , às obtidas a 200°C e temperatura ambiente. Para teores superiores a 10%, foi verificado um favorecimento a manifestação de *spalling*.

3.4 EFEITOS MACROESTRUTURAIS DAS ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

Segundo Cánovaz (1988) um dos primeiros aspectos macro a serem percebidos com o aumento da temperatura é a alteração da coloração do concreto, devido especialmente à presença de compostos ferrosos nos agregados. Uma vez que o efeito colorimétrico é diretamente influenciado por estes compostos ferrosos, a presença de agregados ricos nestes compostos, como silicatos e calcários, acentua o efeito da variação de cor.

A avaliação de estruturas de concreto submetidas a altas temperaturas geralmente requer a extração de corpos de prova para a verificação da perda real da capacidade portante. Porém a análise colorimétrica do concreto, muitas vezes, pode ser uma opção, minimizando as interferências na estrutura já degradada (WENT, 2006).

Went (2006) conclui que é possível identificar, através de diferenças colorimétricas entre elementos de concreto expostos e não expostos, o nível de temperatura de exposição. Sendo que temperaturas de exposição maiores tem maior assertividade e, são de maior interesse, uma vez que maiores temperaturas acarretam em uma maior degradação do concreto.

Estudos nas alterações colorimétricas do concreto, apesar de serem geralmente um bom indicativo das temperaturas atingidas pelo mesmo, não são comuns. Estudos conduzidos na

Inglaterra, utilizando concreto com diversos percentuais e tipos de agregados graúdos (seixo silicoso, granito, calcário e agregado leve de cinza volante) demonstram que é perfeitamente possível traçar um histórico de temperaturas atingidas em um incêndio. Porém, para concretos que utilizam agregados silicosos, deve-se utilizar a alteração de cor do mesmo juntamente a da pasta para uma análise mais acertiva dos picos de temperatura. Para os demais tipos de agregado, somente a pasta de cimento deve ser analisada (SHORT, PURKISS, GUISE, 2001).

Souza e Ripper (1998) reforçam este conceito além de salientar que as alterações de cor no concreto sempre são permanentes, sendo a cor função direta da temperatura em que o concreto foi submetido, e a resistência tendo caráter inversamente proporcional à temperatura alcançada. A Tabela 3 traz as alterações colorimétricas no concreto de acordo com a temperatura atingida.

Tabela 3 - Alterações colorimétricas do concreto.

TEMPERATURA EM °C	COR DO CONCRETO	CONDIÇÃO DO CONCRETO	PERDA DE RESISTÊNCIA
0 a 200	cinza	não afetado	0%
300 a 600	rosa	razoavelmente bom	< 40%
600 a 900	rosa e vermelho	friável, com alta sucção de água	70%
900 a 1200	cinza avermelhado	friável	100%
> 1200	amarelo	decomposto	100%

(fonte: CÁNOVAZ,1988)

3.5 SPALLING

Uma das manifestações patológicas mais recorrentes encontradas em concretos submetidos a altas temperaturas é o deslocamento parcial do elemento, conhecido por *spalling*.

Segundo Kalfa, Menneau e Quenard (2000 apud Lima, 2005) o processo de *spalling* se origina de dois mecanismos distintos, sendo um termomecânico e outro termo hidráulico. O mecanismo termomecânico se origina das tensões geradas pela deformação volumétrica do elemento quando exposto a um gradiente de temperatura. O mecanismo termo hidráulico, por outro lado, provém da movimentação e mudança de estado físico da água, gerando gradientes internos de pressão nos poros da estrutura.

Lima (2005) salienta que o fenômeno de *spalling* é agravado em concretos de alta resistência, ou seja, baixa porosidade, uma vez que a falta de poros conectados dificulta o alívio das tensões geradas pelo vapor de água. Além da porosidade, fatores como taxa de aquecimento, composição dos agregados, adições e até mesmo do cimento tem influência na incidência do *spalling*. Teores de adição mineral, meta caulim e sílica ativa, superiores a 10% podem agravar a manifestação patológica, bem como taxa de aquecimento muito elevadas. A Figura 5 mostra a aparência de uma estrutura após a manifestação patológica de *spalling* em uma situação de incêndio.

Figura 5 – Manifestação de *spalling* em uma estrutura após incêndio.



(fonte: GASTAL, KLEIN & CAMPAGNOLO, 1996)

3.6 FADIGA TÉRMICA

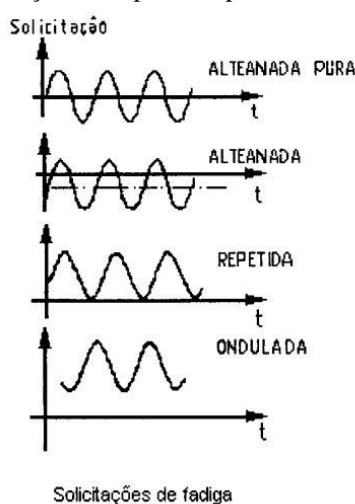
Segundo Callister (2002), define-se por fadiga a falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes sendo, neste cenário, possível a ocorrência de uma falha em nível de tensão consideravelmente inferior aos limites de resistência do material. Ainda segundo Callister (2002), a ruptura devido a fadiga é de caráter frágil, mesmo em materiais dúcteis como o aço. O processo de ruptura por fadiga se caracteriza por três etapas distintas

- Iniciação da trinca: onde alguma trinca se forma em um ponto de alta concentração de tensões.
- Propagação de trinca: durante a qual essa trinca avança em incrementos a cada ciclo de tensões.
- Fratura final: que ocorre muito rapidamente uma vez que a trinca tenha atingido o seu tamanho crítico.

Para Limberger (2000) a falha através do mecanismo de fadiga é especialmente perigosa, uma vez que não ocorre deformação plástica aparente. A fratura causada é de origem frágil e abrupta e se inicia geralmente em uma zona defeituosa ou de menor resistência do material. Para um melhor entendimento do processo de ruptura por fadiga, é essencial compreender a natureza dos ciclos de tensões presentes no elemento, os quais dependem tanto das características físicas do material e dos fatores geométricos como o ambiente no qual este é inserido. As solicitações sobre os componentes podem ser basicamente classificadas como alternadas, puras ou não, repetidas, flutuantes ou aleatórias.

As solicitações alternadas puras são aquelas em que a média de tensão é igual a zero, assim variando a solicitação entre compressão e tração de maneira senoidal. Em complemento, as solicitações alternadas não puras, não possuem média de tensão igual a zero, porém, possuem tensões diferentes em módulo. As solicitações flutuantes ou onduladas são aquelas onde as tensões, máxima e mínima, são diferentes de zero e de mesmo módulo. As solicitações aleatórias são as mais comumente encontradas em componentes mecânicos em serviço, podendo variar em módulo tanto para os valores máximos e mínimos. Finalmente, as solicitações repetidas são aquelas onde a tensão mínima é zero, e geralmente caracterizam a geração de tensões térmicas puras (LIMBERGER, 2000). A Figura 6 ilustra a representação dos diferentes tipos de solicitações presentes na fadiga.

Figura 6 – Gráfico solicitação x tempo dos tipos de ciclos que geram fadiga.



(fonte:LIMBERGER, 2000)

Além de tensões aplicadas diretamente ao material, fatores ambientais também podem iniciar o comportamento de fadiga em materiais. Um desses fatores é a temperatura, caracterizando a

fadiga térmica. A fadiga térmica é induzida normalmente por altas temperaturas e sua flutuação de tensões térmicas. Neste caso as tensões mecânicas de uma fonte externa não necessitam estar presentes. A origem dessas tensões térmicas se dá pela restrição e/ou à contração dimensional. A magnitude de uma tensão térmica desenvolvida por uma variação de temperatura depende do coeficiente de expansão térmica bem como do módulo de elasticidade do material (Callister, 2002).

3.7 FADIGA TÉRMICA EM ELEMENTOS DE CONCRETO

Segundo Bier, Wise e Chang (1991), os primeiros problemas detectados em elementos de concreto submetidos a ciclos térmicos se deu no âmbito militar, na confecção de pistas de pouso com pavimento cimentício. Na época, o exército americano se deparou com manifestações patológicas como deslocamentos e fissuras nas regiões de pouso e decolagem de aeronaves. Como principal causa apontada, foi sugerido que o fenômeno de *spalling* poderia estar se manifestando no pavimento, porém, as manifestações patológicas haviam aparecido entre 1 e 2 anos após o início do uso das pistas, o que não condiz com o fenômeno.

A partir deste caso inicia-se a pesquisa da fadiga térmica em elementos de concreto, os quais por serem materiais cerâmicos, de baixa condutividade e variação dimensional, tinham o efeito de fadiga térmica ignorado. Alguns estudos começam a ser realizados acerca deste tema, tentando identificar tantos os causadores destas manifestações patológicas como os mitigadores da mesma.

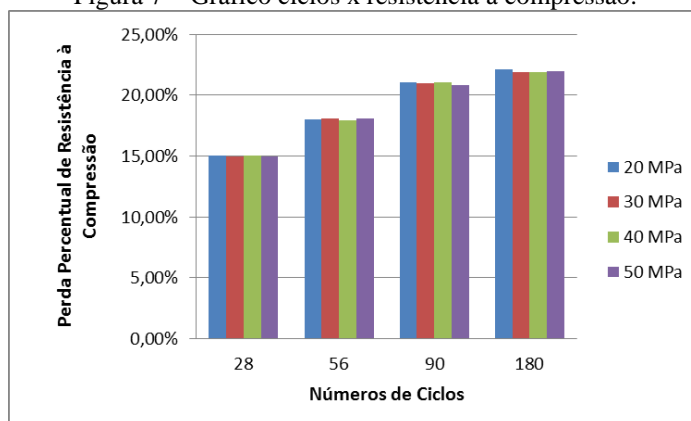
Como exemplos mais recentes podemos citar Chandramouli et al. (2006), na análise dos efeitos da ciclagem térmica na resistência a compressão em concretos convencionais de diversas resistências. Khan (2014) investiga a influência dos ciclos térmicos na resistência à flexão de elementos de concreto. Sravanna, Rao e Rao (2004) estudam a influência dos ciclos térmicos na resistência à compressão bem como da adição de cinza volante (*flyash*) na mitigação dos efeitos da ciclagem térmica.

Bier, Wise e Chang (1991), em seu estudo, avaliam a porosidade, resistência à compressão e flexão de lajes de concreto armado submetidas a ciclos rápidos de aquecimento por meio de sopro de ar nas temperaturas de 150 e 220^oC. Durante sua avaliação, os dados de resistência não tiveram grande variação, porém a porosidade superficial dos elementos estudados teve um aumento significativo após seis ciclos de aquecimento, constatado assim, que mesmo

temperaturas relativamente baixas, quando aplicadas intercaladamente, geravam tensões suficientes para a propagação de micro fissuras. Em seus experimentos, após 50 ciclos de variação térmica, foi constatada uma queda relativa das amostras não cicladas de 20% na resistência à flexão. Com base nestes dados, foi concluído que a exposição do concreto a ciclos térmicos propicia a degradação da resistência mecânica bem como o aumento da porosidade superficial.

Chandramouli et al. (2006) realizaram um estudo mais detalhado e abrangente sobre os efeitos da fadiga térmica em concreto, utilizando de traços com resistências entre 20 e 50 MPa submetidos a 28, 56, 90 e 180 ciclos de aquecimento. Para a configuração do ciclo térmico foi utilizada uma temperatura de 50^oC, na qual o corpo de prova passava por 8 horas de aquecimento seguidas de 16 horas de resfriamento. Como resultado do estudo, é constatado que, independente da resistência do concreto, a perda percentual de capacidade portante é a mesma, variando entre 14 e 22% conforme o número de ciclos. Como principal causa desta variação é apontada a diferença de dilatação térmica entre os componentes da matriz. A Figura 7 apresenta os dados obtidos por Chandramouli et al. (2006) em sua pesquisa.

Figura 7 – Gráfico ciclos x resistência à compressão.



(fonte: CHANDRAMOULI et al., 2006)

Khan (2014), por sua vez, analisou a resistência à flexão de elementos prismáticos de concreto submetidos a ciclos térmicos através de um estudo justificado principalmente pela utilização de concreto convencional na fabricação de chaminés. Devido a sua justificativa, Khan(2014) utiliza-se da temperatura de 200^oC e de ciclos mais longos, remetendo ao funcionamento destes equipamentos, com períodos de aquecimento de 8 horas seguidos de 16 horas de resfriamento das peças. Como resultado, o autor avaliou corpos de prova submetidos

a 0, 7, 14, 21 e 28 ciclos, e constatou um acréscimo de resistência nos primeiros sete ciclos, porém uma tendência forte a queda nos demais ciclos.

Apesar da existência de alguns trabalhos na área, o tema de fadiga térmica em elementos de concreto é muito pouco desenvolvido, carecendo de padronização e intercomunicação entre as pesquisas existentes. Pesquisas dispersas e com metodologias bruscamente divergentes são fatores que favorecem o baixo conhecimento adquirido na área atualmente. No Brasil o tema não apresenta pesquisas, sendo o comparativo de pesquisas internacionais às condições de operação e materiais utilizados nacionalmente de difícil valia.

4 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo trata da definição dos parâmetros utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, com foco para a análise experimental. Serão descritos os materiais e métodos de ensaio adotados durante o trabalho.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

O cimento selecionado para a formulação do traço do concreto foi o CP V – ARI da marca Nacional. Este tipo de cimento foi escolhido devido a sua capacidade de desenvolver resistência em um período de tempo menor que as demais opções disponíveis, e também por ser um cimento com menor quantidade de adições em comparação com os demais disponíveis no mercado. A Tabela 4 mostra as análises físico-químicas do cimento escolhido.

Tabela 4 – Características físico químicas do cimento utilizado.

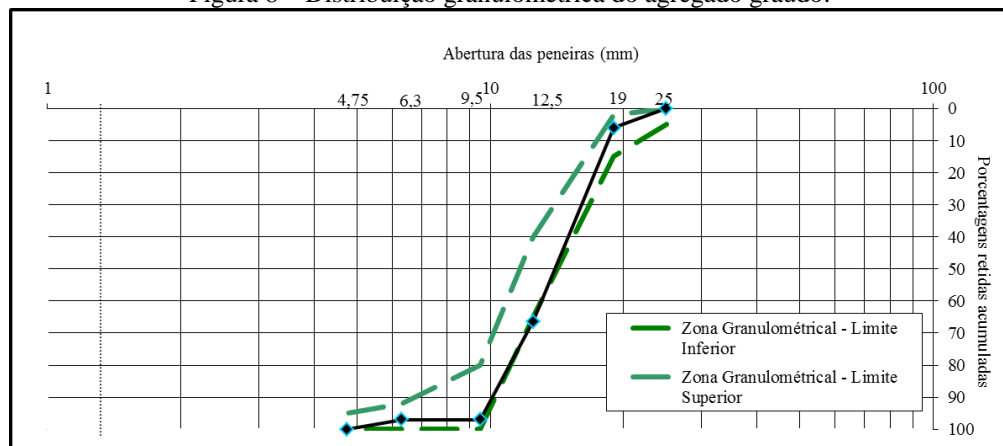
Características do CPV-ARI	Resultados	Exigido	NBR
Resíduo na peneira 75mm (%)	0,1	≤ 6	11579/91
Finura de Blaine (cm ² /g)	4401	≥ 3000	NM 76/98
Tempo de pega			NM 65/02
Início (min)	140	≥ 60	
Término (min)	187	≤ 600	
Expansibilidade a quente (mm)	0	≤ 5,0	11582/91
Massa específica (g/cm ³)	3,11	-	NM 23/01
Diâmetro médio (µm)	11,56	-	
Resistência à compressão (MPa)			7215/96
1 dia	27,6	≥ 11	
3 dias	40,4	≥ 24	
7 dias	46,0	≥ 34	
28 dias	55,3	-	
SiO ₂ (%)	17,83	-	
CaO (%)	68,11	-	
Al ₂ O ₃ (%)	1,92		
Fe ₂ O ₃ (%)	2,96		
K ₂ O (%)	1,28		
Perda ao Fogo (%)	2,56	≤ 4,5	NM 18/12
Óxido de Magnésio - MgO (%)	1,49	≤ 6,5	NM 21/04
Trióxido de Enxofre - SO ₃ (%)	3,02	≤ 4,5	NM 16/09
Anidrido Carbônico – CO ₂ (%)	1,02	≤ 3,0	NM 20/09

(fonte: ALMEIDA, 2017).

4.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a brita de origem basáltica proveniente da região metropolitana de Porto Alegre/RS. O diâmetro máximo característico do referido agregado é de 19 mm e o módulo de finura de 7,04. A Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado.

Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.

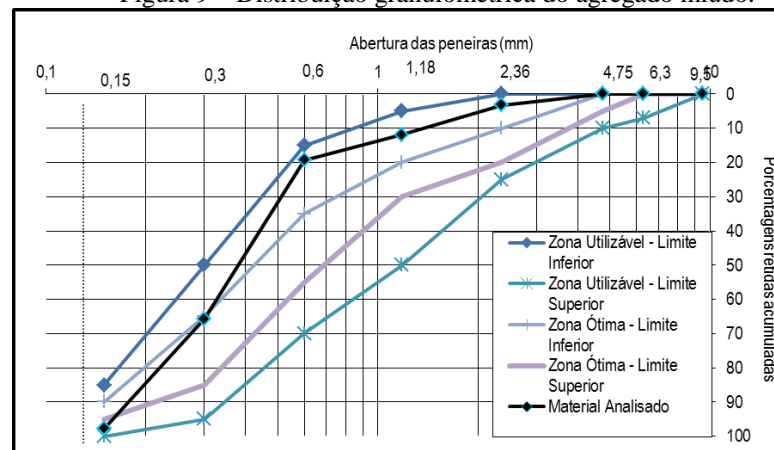


(fonte: elaborado pelo Autor)

4.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia de origem quartzosa proveniente da região metropolitana de Porto Alegre/RS, oriunda do rio Jacuí, apresentando diâmetro máximo de 2,4 mm e o módulo de finura de 2,40. A Figura 9 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado.

Figura 9 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.



(fonte: elaborado pelo Autor)

4.2 TRAÇO, MISTURA E TRATAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

4.2.2 Traço

O traço utilizado foi definido com base nos estudos já realizados na área, assim, se limitando a uma resistência estimada comumente utilizada em elementos estruturais de concreto, de aproximadamente 40 MPa. Chandramouli et al. (2006) fizeram uso de resistências estimadas entre 20 e 50 MPa para seu estudo sobre a influência da ciclagem térmica na resistência a compressão de elementos de concreto, visando a situação real de resistência a compressão de projeto de uma estrutura. Para atingir tais requisitos foi utilizado um traço previamente estudado no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS, com relação água/cimento de 0,60 e traço 1:3:4 (cimento; areia; brita), em massa.

4.2.2 Ciclos

Para a definição do método de ciclagem térmica foi consultada a bibliografia existente na área, assim, como descrito por Chandramouli et al. (2006) e Khan (2014), o aquecimento e resfriamento do elemento de concreto não deve ser brusco, afim de evitar grandes gradientes de temperatura na estrutura. Para isso foi definido um período de aquecimento de 8 horas a uma taxa de calefação de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (menor taxa de ensaio do equipamento utilizado) em forno elétrico industrial computadorizado, modelo Sanchis. O resfriamento das amostras foi feito a temperatura ambiente durante 16 horas, assim completando um ciclo em 24 horas.

A temperatura de patamar foi estipulada em 200°C , uma vez que, geralmente para condições de uso em temperaturas superiores, há utilização de material refratário com a finalidade da redução das ações térmicas sobre o concreto (SANTOS, 2008).

Diferente de uma estrutura real o aquecimento dos corpos de prova foi de maneira uniforme em todas as faces. Evitando o efeito dos gradientes de temperatura presentes em situações de serviço onde, normalmente, a estrutura está submetida parcialmente a oscilação térmica.

4.3 MÉTODOS DE ENSAIO

4.3.1 Absorção de água e índice de vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios foi realizado conforme Norma Brasileira NBR 9778 (ABNT, 2009) no qual os corpos de prova são pesados nos estados seco, saturado e submerso. O processo de secagem do corpo de prova à temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ em estufa durante 72 horas ou constância de massa resulta na temperatura da amostra seca. A massa saturada é obtida através da pesagem das amostras submetidas à submersão progressiva, um terço da altura da amostra a cada quatro horas, sendo que a última etapa, de total submersão, dura 64 horas. A pesagem da amostra totalmente submersa resulta na massa submersa da mesma. De posse destes três valores aplica-se as equações 01 e 02 para a obtenção dos valores absorção e de índice de vazios.

$$\frac{M_{sat}-M_{sec}}{M_{sec}} * 100 = \textit{Absorção} \quad \text{Eq. 01}$$

$$\frac{M_{sat}-M_{sec}}{M_{sat}-M_{sub}} * 100 = \textit{Índice de Vazios} \quad \text{Eq. 02}$$

Onde:

M_{sec} = massa seca

M_{sat} = massa saturada

M_{sub} = massa submersa

Como os corpos de prova submetidos aos ciclos já possuem constância de massa, a etapa de secagem em estufa pode ser desconsiderada do ensaio.

4.3.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência a compressão seguiu a Norma Brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo utilizado para ruptura uma prensa da marca Shimadzu de 2.000 kN com velocidade de carregamento de $0,45\pm 0,05\text{MPa/s}$. Para a regularização da superfície de aplicação de carga foram utilizados discos de neoprene. A Figura 10 mostra um corpo de prova durante o ensaio de resistência a compressão.

Figura 10 – Corpo de prova durante ensaio de resistência à compressão.



(fonte: Autor)

4.3.3 Compressão diametral

O ensaio de resistência a compressão diametral foi realizado segundo Norma Brasileira NBR 7222 (ABNT, 2010) utilizando-se para a ruptura uma prensa Shimadzu de 2.000 kN com velocidade de carregamento de $0,05 \pm 0,02 \text{ Mpa/s}$, regularizando-se a superfície de aplicação da carga com duas tiras de madeira com dimensões sugeridas na norma. A Figura 11 mostra um corpo de prova durante o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 11 – Corpo de prova durante ensaio de compressão diametral.



(fonte: Autor)

4.3.4 Velocidade de propagação de pulso ultrassônico

O ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico (VPU) seguiu as recomendações da Norma Brasileira NBR 8802 (ABNT, 2013) sendo utilizado o equipamento PunditLab, da marca Proceq, com transdutor de frequência equivalente a 54 kHz. As leituras do tempo de propagação foram efetuadas pelo método direto com a utilização de um gabarito pra garantir o

alinhamento entre o transdutor e o receptor. A Figura 12 mostra um corpo de prova durante o ensaio de VPU.

Figura 12 – Corpo de prova durante ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.



(fonte: Autor)

5 RESULTADOS E TRATAMENTO DE DADOS

5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos nos ensaios de absorção e índice de vazios, nos quais observou-se um aumento gradual atrelado ao número de ciclos.

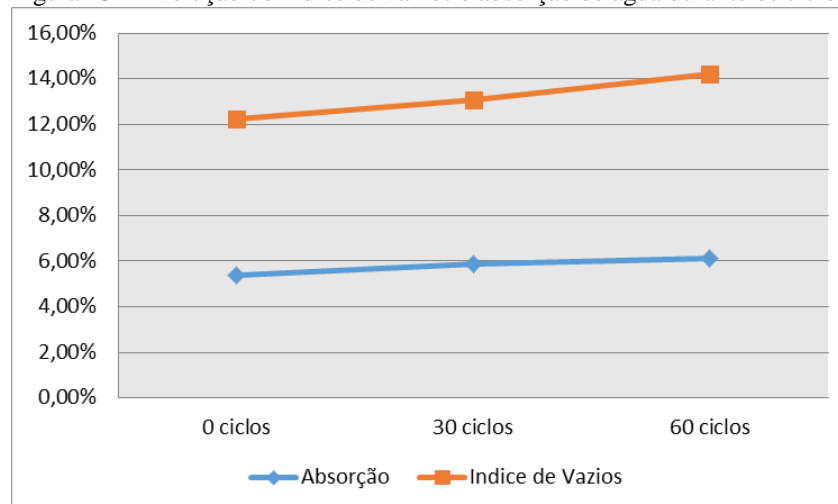
Tabela 5 – Resultados para os ensaios de absorção de água e índice de vazios.

	Absorção			Média
0 ciclos	5,33%	5,44%	5,41%	5,39%
30 ciclos	5,74%	5,79%	6,02%	5,85%
60 ciclos	6,03%	6,27%	6,03%	6,11%
	Índice de Vazios			Média
0 ciclos	11,93%	12,43%	12,33%	12,23%
30 ciclos	12,70%	12,93%	13,63%	13,09%
60 ciclos	14,09%	14,55%	14,04%	14,23%

(fonte: Autor)

A Figura 13 apresenta o gráfico da evolução da absorção de água e índice de vazios de acordo com o número de ciclos aos quais os corpos de prova foram expostos.

Figura 13 – Evolução do índice de vazios e absorção de água durante os ciclos.



(fonte: Autor)

Como análise complementar dos dados obtidos, foi utilizado da avaliação estatística Anova One-Way, tendo como resultado um valor F calculado > F crítico para um coeficiente de

correlação de 95%, assim confirmando a relevância na diferença das médias obtidas para cada combinação de fatores. As Tabelas 6 e 7 apresentam, respectivamente, as análises feitas para a absorção de água e para o índice de vazios.

Tabela 6 – Teste Anova One-Way para o ensaio de absorção de água.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0 ciclos	3	0,161745	0,053915	3,49E-07
30 ciclos	3	0,175524	0,058508	2,27E-06
60 ciclos	3	0,183237	0,061079	1,88E-06

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,9E-05	2	3,95E-05	26,37034	0,001066	5,143253
Dentro dos grupos	8,99E-06	6	1,5E-06			
Total	8,8E-05	8				

(fonte: Autor)

Tabela 7 – Teste Anova One-Way para o ensaio de índice de vazios.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0 ciclos	3	0,366854	0,122285	7,09E-06
30 ciclos	3	0,392563	0,130854	2,37E-05
60 ciclos	3	0,426801	0,142267	7,93E-06

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000603	2	0,000301	23,34682	0,001476	5,143253
Dentro dos grupos	7,75E-05	6	1,29E-05			
Total	0,00068	8				

(fonte: Autor)

Acredita-se que a elevação dos índices de vazios e absorção de água ocorreu devido à variação volumétrica dos componentes do concreto durante a variação térmica. A variação volumétrica se dá tanto pela desidratação e re-hidratação dos componentes do concreto, quanto pelas pequenas diferenças nos coeficientes de dilatação, gerando tensões cíclicas na interface pasta agregado.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão. Este ensaio apresentou resultados de quedas de resistência de 10,5% e 17,4%, para 30 e 60 ciclos respectivamente.

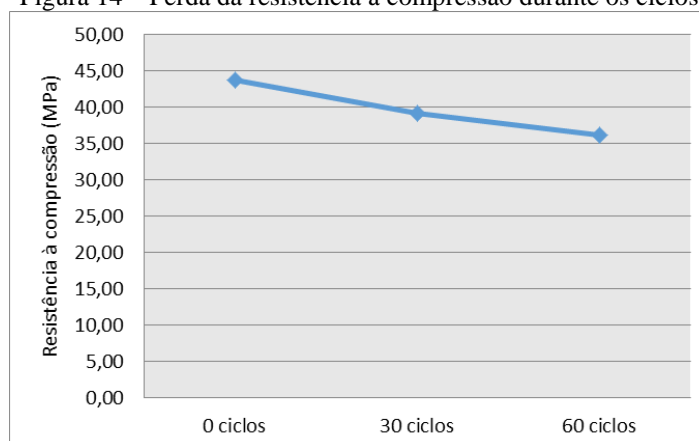
Tabela 8 – Resultados para os ensaios de absorção de resistência à compressão em MPa.

	Compressão			Média
0 ciclos	42,20	46,23	43,04	43,82
30 ciclos	38,94	39,65	39,06	39,22
60 ciclos	36,91	38,12	33,62	36,22

(fonte: Autor)

A Figura 14 apresenta o gráfico da perda da resistência à compressão, obtida durante os ensaios.

Figura 14 – Perda da resistência à compressão durante os ciclos.



(fonte: Autor)

Novamente como análise complementar dos dados obtidos, foi utilizada a avaliação estatística Anova One-Way, tendo como resultado um valor F calculado $>$ F crítico para um coeficiente de correlação de 95%, assim confirmando a relevância na diferença das médias obtidas para cada combinação de fatores. A Tabela 9 apresenta, a análise feita para variação dos resultados no ensaio de resistência à compressão.

Tabela 9 – Teste Anova One-Way para o ensaio de resistência a compressão.

RESUMO					
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
0 ciclos	3	131,47	43,82333	4,520433	
30 ciclos	3	117,65	39,21667	0,144433	
60 ciclos	3	108,65	36,21667	5,423033	

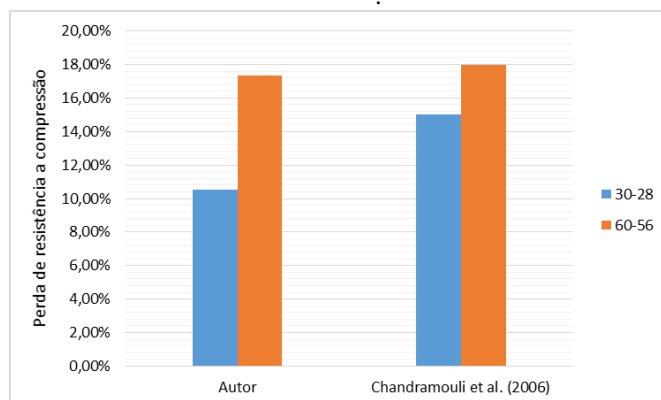
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	88,08276	2	44,04138	13,09729	0,006473	5,143253
Dentro dos grupos	20,1758	6	3,362633			
Total	108,2586	8				

(fonte: Autor)

O provável motivo da queda na resistência a compressão é a microfissuração, gerada devido as alterações volumétricas causadas pela ciclagem térmica. Esta hipótese pode ser validada verificando-se que, além da queda na resistência, os corpos de prova também tiveram um aumento na porosidade quando submetidos à oscilação térmica.

Comparando-se os resultados obtidos aos encontrados por Chandramouli et al. (2006) em seu estudo sobre a perda da resistência térmica em concretos submetidos a fadiga térmica, nota-se uma tendência em ambas pesquisas a um crescimento na perda da resistência conforme o avanço do número de ciclos. Outro fator interessante no comparativo entre os estudos, é o fato do patamar de temperatura utilizado por Chandramouli et al. (2006) ser de 50°C, indicando que, possivelmente, o número de ciclos ao qual os corpos de prova são submetidos, tem maior influência na queda da resistência que a temperatura de patamar em si. A Figura 15 apresenta a perda percentual na resistência à compressão obtidos em ambos os estudos.

Figura 15 – Comparativo de resultados entre o autor e Chandramouli et al. (2006).



(fonte: Autor)

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 10 mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Este ensaio apresentou resultados com degradação a uma taxa superior a resistência à compressão, tendo quedas de resistência de 10,5% e 29,7%, para 30 e 60 ciclos respectivamente.

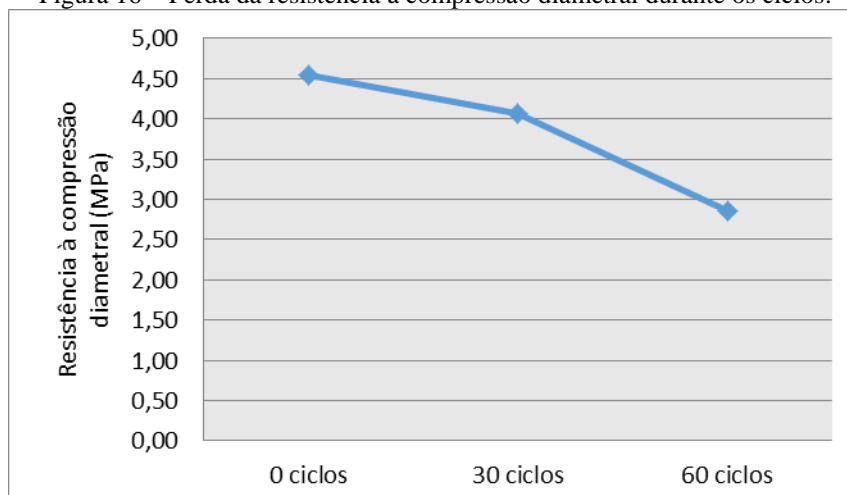
Tabela 10 – Resultados para os ensaios de absorção de resistência à compressão diametral em MPa.

	Tração			Média
0 ciclos	4,17	5,04	4,45	4,55
30 ciclos	4,32	3,99	3,90	4,07
60 ciclos	2,58	3,26	2,75	2,86

(fonte: Autor)

A Figura 16 apresenta o gráfico da perda da resistência à compressão diametral, obtida durante os ensaios.

Figura 16 – Perda da resistência à compressão diametral durante os ciclos.



(fonte: Autor)

Novamente como análise complementar dos dados obtidos, foi utilizada a avaliação estatística Anova One-Way, tendo como resultado um valor F calculado > F crítico para um coeficiente de correlação de 95%, assim confirmando a relevância na diferença das médias obtidas para cada combinação de fatores. A Tabela 11 apresenta, a análise feita para variação dos resultados no ensaio de resistência à compressão.

Tabela 11 – Teste Anova One-Way para o ensaio de resistência a compressão diametral.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0 ciclos	3	13,65231	4,55077	0,195513
30 ciclos	3	12,21037	4,070122	0,049813
60 ciclos	3	8,588001	2,862667	0,122805

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,538664	2	2,269332	18,49344	0,002719	5,143253
Dentro dos grupos	0,736261	6	0,12271			
Total	5,274925	8				

(fonte: Autor)

Assim como na perda da resistência a compressão, o provável motivo da queda na resistência a compressão diametral é a microfisuração, gerada devido às alterações volumétricas causadas pela ciclagem térmica. Esta hipótese pode ser validada verificando-se que, além da queda na resistência, os corpos de prova também tiveram um aumento na porosidade quando submetidos à oscilação térmica.

5.4 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE PULSO ULTRASSÔNICO

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de pulso ultrassônico. Este ensaio apresentou uma maior variação nos primeiros trinta ciclos de exposição em comparação aos trinta últimos, em comparação com os demais ensaios apresentados anteriormente.

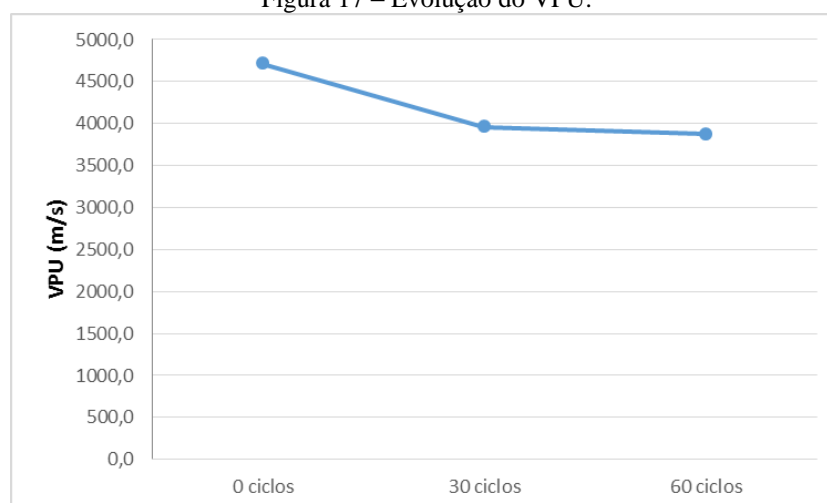
Tabela 12 – Resultados para os ensaios de VPU (m/s).

	0 ciclos	30 ciclos	60 ciclos
Ultrassom	4629,6	3937,0	3831,4
	4761,9	3906,3	3891,1
	4705,9	3883,5	3891,1
	4750,6	4008,0	3944,8
	4566,2	4000,0	3929,3
	4750,6	3984,1	3929,3
	4694,8	3952,6	3766,5
	4761,9	3968,3	3960,4
	4761,9	3968,3	3690,0
Média	4709,3	3956,4	3870,4

(fonte: Autor)

A Figura 17 apresenta o gráfico da VPU, obtida durante os ensaios.

Figura 17 – Evolução do VPU.



(fonte: Autor)

Novamente como análise complementar dos dados obtidos, foi utilizada a avaliação estatística Anova One-Way, tendo como resultado um valor F calculado $>$ F crítico para um coeficiente de correlação de 95%, assim confirmando a relevância na diferença das médias obtidas para cada combinação de fatores. A Tabela 13 apresenta, a análise feita para variação dos resultados no ensaio de resistência à compressão.

Tabela 13 – Teste Anova One-Way para o ensaio de propagação de pulso ultrassônico.

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0 ciclos	9	382,3	42,47778	0,406944
30 ciclos	9	455	50,55556	0,285278
60 ciclos	9	465,3	51,7	1,545

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	454,8289	2	227,4144	304,9511	8,67E-18	3,402826
Dentro dos grupos	17,89778	24	0,745741			
Total	472,7267	26				

(fonte: Autor)

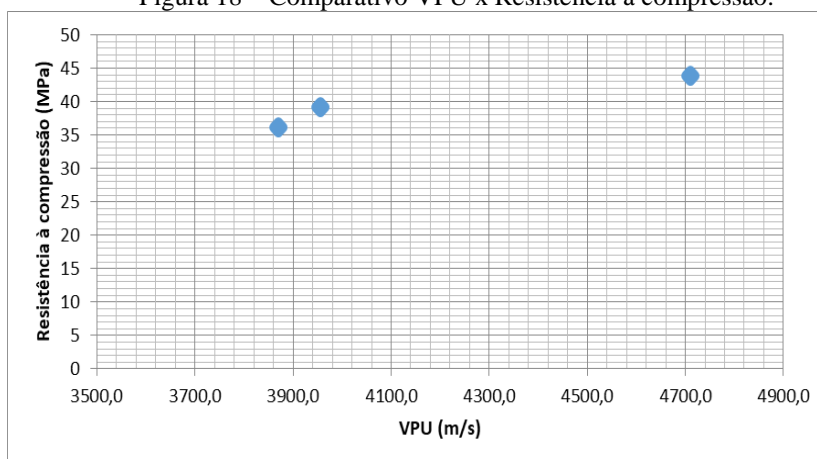
Acredita-se que devido ao aumento da porosidade dos corpos de prova, o ensaio de VPU comprova a ocorrência da microfissuração. Uma vez que o som percorre mais rapidamente materiais de maior densidade, quanto maior o número de vazios em um elemento, maior o tempo de travessia do pulso. Os resultados demonstram um crescente aumento no tempo de

resposta entre os emissores, resultado que, associado com os demais já listados, aponta o fenômeno de microfissuração por variação volumétrica como o principal agente patológico responsável pela perda da resistência mecânica do concreto exposto a ciclos térmicos.

5.5 COMPARATIVO ENTRE PROPRIEDADES

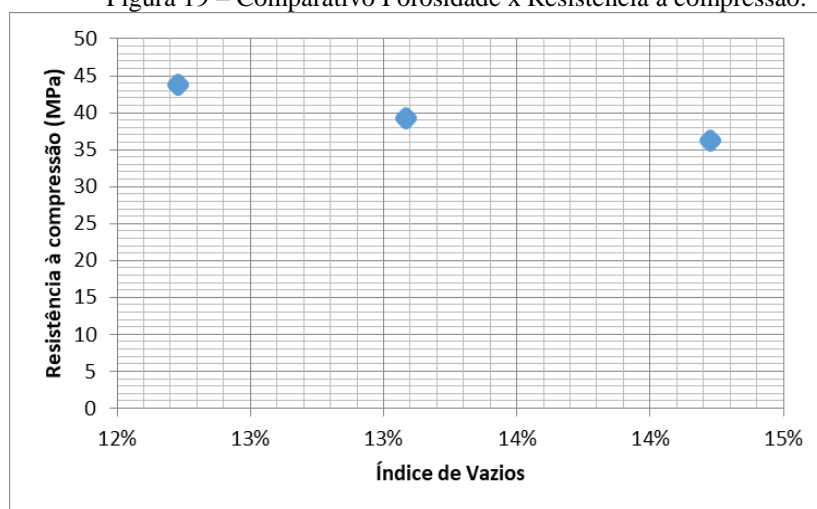
Foi realizado um comparativo entre a propriedade de resistência à compressão com os resultados obtidos do ensaio de VPU e de porosidade. Estes resultados estão apresentados nas Figuras 18 e 19, respectivamente.

Figura 18 – Comparativo VPU x Resistência à compressão.



(fonte: Autor)

Figura 19 – Comparativo Porosidade x Resistência à compressão.



(fonte: Autor)

Percebe-se que para perdas iniciais o ensaio de VPU possui mais sensibilidade, assim sendo mais recomendado como indicador qualitativo da degradação do concreto. Já na comparação com a porosidade, percebe-se um comportamento mais linear em relação à perda de resistência, sendo este mais recomendado como indicador quantitativo da degradação do concreto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item apresentam-se as principais conclusões do trabalho, válidas para os ensaios realizados nesta pesquisa e com base na análise dos resultados experimentais. São também apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos, no que se refere à resistência compressão, é possível afirmar que há uma correlação entre o número de ciclos térmicos e a queda da capacidade portante. O comportamento deste fenômeno, dentro dos parâmetros verificados, teve características lineares, confirmando a hipótese sugerida.

A análise da resistência à tração por meio de compressão diametral confirmou a hipótese de relação entre a ciclagem térmica e a queda da resistência. Porém o comportamento da resistência à tração teve características não lineares, diferindo em proporção da queda na resistência à compressão, sugerindo que o fenômeno de oscilação térmica tem maiores impactos nesta propriedade do concreto.

A verificação da porosidade por intermédio do índice de vazios e absorção de água teve comportamento inversamente proporcional à queda de resistência à compressão. Sugerindo que a queda na capacidade portante se deu devido ao micro fissuramento interno no concreto.

A avaliação do tempo de propagação de pulso ultrassônico foi condizente com os itens citados anteriormente, afirmando a hipótese de que a micro fissuração é a responsável pela queda das propriedades mecânicas do concreto.

Como resultado mais relevante, levando em consideração os ensaios efetuados e dados obtidos, é possível apontar como principal causa da perda de resistência mecânica do concreto a microfissuração. Proveniente da variação volumétrica, tanto por ciclos de re-hidratação como por pequenas diferenças entre os coeficientes de dilatação dos elementos presentes no concreto. Além da perda de resistência mecânica propriamente dita, os ensaios de pulso

ultrassônico, absorção de água e índice de vazios comprovam o aumento da porosidade do concreto.

6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como comentado anteriormente, a elaboração deste trabalho abriu margem para o aprofundamento em novas questões. Algumas possibilidades de estudos futuros encontrados foram:

- a) análise de diferentes tipos de concreto expostos á ciclagem térmica.
- b) elaboração de estimativas de perda de resistência para estruturas submetidas a ciclos térmicos de baixa intensidade.
- c) quantificação do efeito dos ciclos e temperatura isolados na degradação de concretos expostos a oscilação térmica
- d) verificação da utilização de aditivos como medida mitigatória a fadiga térmica.
- e) avaliar ciclos e temperaturas de maneira mais abrangente, bem como resistências diversas para o concreto, com a finalidade de melhor descrever o fenômeno.
- f) verificação microscópica da fissuração decorrente da ciclagem térmica, assim definindo de maneira mais assertiva qual fator é o principal gerador de tensões internas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.M.A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de arroz.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. UFRGS, Porto Alegre.
- ALONSO, C. et al. **Microstructure & Microcracking. In: COURSE ON EFFECT OF HEAT ON CONCRETE**, 2003, Udine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, 2003. 17p. Apostila.
- BIER, T.A., WISE S., CHANG P. **A Mechanistic Study of Failure of Concrete Subjective to Cyclic Thermal Loads.**1991. Pesquisa – Naval Civil Laboratory, PortHueneme, 1991.
- CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5.ed Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.
- CÁNOVAZ, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado.** São Paulo: Pini, 1988.
- CASTELLOTE M., ALONSO C., ANDRADE C., TURRILAS X., CAMPO J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1633-1644, 2004.
- CHANDRAMOULI, K., RAO P.S., SEKHAR T.S., PANNIRSELVAM N., SRAVANA P. **Effect of Thermal Cycles on Compressive Strength of Different Grades of Concrete.**2006. Pesquisa – Vellore Institute of Technology University, Vellore, 2006.
- COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Estruturas de concreto em situação de incêndio.** In: JORNADAS SULAMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. Anais... Brasília: PECC-UnB/ ASAAE, 2002.
- GASTAL, F.P.S.L.; KLEIN, D.L.; CAMPAGNOLO, J.L. **Vistoria técnica do prédio so Condomínio Edifício Cacique após o sinistro de 26/06/96.** Porto Alegre: Laboratório de Ensaios e modelos Estruturais, 1996. (Relatório Técnico 08/1996)
- KHAN, M. S. **Flexural strength of concrete subjected to termal cyclic loads.** *KSCE Journal of Civil Engeneering*, South Korea, 2014.
- 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.
- LIMBERGER, I.F. **Estudo da Propagação de Trincas Transversais por Fadiga em Trilhos Ferroviários.** 2000. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades, Materiais**. 2 ed., São Paulo, Ibracon, 2014.

MONTEIRO, P. M. **Nanotechnology to serve building materials. Exploring New Materials**. Disponível em: <http://www.lafarge.com/07022007-research_innovation-nanotechnologies-uk.pdf. 2007>. Acesso em: 20 de ago. 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2010.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. **Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido**. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011.

SHORT, N.R; PURKISS, J.A; GUISE, S. E. Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. **Construction and Building Materials**, v 15, p.9 – 15, February, 2001. Disponível em. Acesso em: 20/10/2017

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

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. – São Paulo: Pini, 1998.

SRAVANA, P., RAO, P. S., RAO, M. V. S. **Effect of Thermal Cycles on Compressive Strength of High Volume Fly Ash Concrete**. Conference Our World in Concrete & Structures, Singapura, 2006.

WENDT, S.C. **Análise da Mudança de Cor em Concretos Submetidos a Altas Temperaturas como Indicativo de Temperaturas Alcançadas e da Degradação Térmica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.