

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

Jorge Luiz da Silva Nunes

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA
TÉCNICA DE RESFRIAMENTO, TIPO E PERÍODO DE CURA
EM ELEMENTOS DE CONCRETO SUBMETIDOS A ALTAS
TEMPERATURAS**

Porto Alegre
2018

JORGE LUIZ DA SILVA NUNES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA
TÉCNICA DE RESFRIAMENTO, TIPO E PERÍODO DE CURA
EM ELEMENTOS DE CONCRETO SUBMETIDOS A ALTAS
TEMPERATURAS**

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

Orientadora: Ângela Gaio Graeff
Coorientador: Jacinto M. A. de Almeida

Porto Alegre
2018

JORGE LUIZ DA SILVA NUNES

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA TÉCNICA DE RESFRIAMENTO, TIPO E PERÍODO DE CURA EM ELEMENTOS DE CONCRETO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Orientadora e pela Coordenadora da atividade de ensino Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2018

Profa. Ângela Gaio Graeff
Doutora pela Universidade Sheffield
Orientadora

Professor Jacinto Manuel Antunes de Almeida
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Co-orientador

BANCA EXAMINADORA

Dra. Ângela Gaio Graeff
Doutora pela Universidade Sheffield

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

Dr. Luís Carlos Pinto da Silva Filho
Doutor pela Universidade de Leeds

Dr. Eduardo Estevam Camargo Rodrigues
Doutor pela Universidade de Coimbra

Dedico este trabalho aos meus pais, Iracema e Jorge,
que foram à base do meu ser.

AGRADECIMENTOS

Meus mais sinceros agradecimentos aos professores Ângela G. Graeff e Jacinto M. A. Almeida, pela perspicaz orientação e amparo mantidos desde a primeira reunião até a conclusão deste estudo, sempre demonstrando grande conhecimento quando sanando minhas dúvidas com boas e criativas soluções para os problemas decorrentes do trabalho.

A toda equipe do LEME, juntamente a engenheira Fernanda R. T. Mattos, os quais se mostraram prestativos e prontos a contribuir pró-ativamente durante toda a fase de ensaios transcorrida naquele laboratório.

Ao meu colega e antes de tudo amigo, Jairo Garcez, pelo apoio e estímulo nos momentos em que tive dúvidas sobre a graduação.

Aos meus familiares por acreditarem nas minhas capacidades e sempre me estimular.

Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta,
a quinta e quantas vezes for necessário.
Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência
é amiga da conquista. Se você quer chegar a aonde a maioria não chega,
faça o que a maioria não faz.

Bill Gates

RESUMO

O profuso emprego do concreto para construção, seu histórico de utilidades e continuada pesquisa de aprimoramento, legitimaram o uso deste material na construção civil mundial.

Os projetos em concreto são acreditados como seguros em situação de incêndio, tendo em vista o bom comportamento do material quando exposto ao fogo, como baixa condutividade térmica, incombustibilidade e não emissão de vapores ou gases tóxicos. No entanto, fatores como o impacto da temperatura sobre suas características mecânicas (módulo de elasticidade e resistência característica a compressão), desempenho distinto dos seus constituintes e a eventualidade de ocorrência do fenômeno *spalling* explosivo em concretos muito compactos, apontam a fragilidade do material frente às altas temperaturas, justificando a importância da pesquisa focada para verificações da segurança frente a ocorrências de incêndio.

Consoante aos estudos das características do material após a exposição ao fogo se faz necessária uma linha de pesquisa voltada a encontrar processos que possibilitem mitigar e contribuir na recuperação das avarias decorrentes do sinistro, visto que, por vezes, a substituição ou reforço dos elementos deteriorados apresenta impeditivo frente aos gastos resultantes.

O presente trabalho apresenta os resultados comparativos de algumas características micro e macroestruturais dos concretos que foram aquecidos a altas temperaturas e, posteriormente, resfriados lentamente ao ar e resfriados rapidamente com o uso de água, tendo em vista que estas são as duas formas mais difundidas de resfriamento utilizadas no cotidiano. Os concretos após o resfriamento foram submetidos a diferentes processos e períodos de cura, empregados como medidas complementares no resgate de uma parcela da resistência à compressão por meio da reidratação do material.

Os dados produzidos e apresentados apontam uma tendência da reidratação, quando implementados dentro de certas condições específicas de temperatura de exposição e período de cura, e contribuiriam positivamente na recuperação de parte das propriedades perdidas.

Palavras chave: *concreto, reidratação, incêndio, altas temperaturas.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Hipótese de resposta dos CPs após ensaios.	14
Figura 2 - Diagrama do delineamento do trabalho	16
Figura 3 - Curva de evolução do incêndio.....	17
Figura 4 - Processo evolutivo de um incêndio	18
Figura 5 - Evolução da porosidade decorrente da temperatura	24
Figura 6 - Exemplos de spalling explosivo após incêndio simulado.....	26
Figura 7 - Comparativo de perda de massa entre concretos expostos a altas temperaturas ..	28
Figura 8 - Fator de redução da resistência do concreto a compressão	29
Figura 9 - Exemplo de cor resultando de processos distintos de resfriamento.....	30
Figura 10 - Resistência a compressão para concretos aquecidos a 300°C.	34
Figura 11 - Resistência a compressão para concretos aquecidos a 600°C.	35
Figura 12 - Lote representativo do conjunto de CPs que foi ensaiado para um processo de reidratação	39
Figura 13 - Material pesado para um traço.....	42
Figura 14 - (a) Verificação do abatimento, (b) adensamento com uso de mesa vibratória.	43
Figura 15 - Lote de CPs acomodado na câmara úmida	43
Figura 16 – Processo de retificação dos CPs.....	44
Figura 17 - Composição dos grupos de CPs sem reidratação.....	44
Figura 18 - Lotes de CPs reidratados a 30 e 90 dias.....	45
Figura 19 - Distribuição dos CPs no interior do forno	47
Figura 20 – Pesagem após o aquecimento.....	48
Figura 21 - Equipamento para resfriamento com água.....	48
Figura 22 - CPs resfriados com água aguardando equalização com temperatura ambiente.....	49
Figura 23 - Ensaio de compressão mecânica.....	50
Figura 24 - Ensaio de VPU.....	51
Figura 25 - Exemplos da degradação sofrida por alguns CPs dentro no mesmo lote ensaiado	51
Figura 26 - Variação da cor após ensaios em diferentes temperaturas.....	52
Figura 27 - Variação da VPU de acordo com o processo de resfriamento e temperatura.....	54
Figura 28 - Variação da VPU para o aquecimento a 300°C ao longo do processo de reidratação	56
Figura 29 - Variação da VPU para o aquecimento a 550°C ao longo do processo de reidratação	57

Figura 30 - Variação da VPU para o aquecimento a 800°C ao longo do processo de reidratação	57
Figura 31 - Alteração da absorção de água X índice de vazios ao longo dos processos	59
Figura 32 - Lote finalizado para ensaio de compressão	61
Figura 33 - Variação da resistência a compressão ao longo da elevação das temperaturas	62
Figura 34 - Variação da massa ao longo da elevação das temperaturas	62
Figura 35 – Comparativo da resistência estimada em norma versus resistências encontradas nos ensaios	65
Figura 36 - Variação da resistência de acordo com os processos de resfriamento.....	66
<p>O processo de reidratação, com metodologia descrita ao item 4.4, apresenta resultados expostos nas figuras 37 a 39. Conforme pode ser verificado, o concreto apresenta ganhos de resistência nos primeiros 30 dias de reidratação, para todas as amostras, independente das temperaturas ou processos de resfriamento ao qual foram submetidos, indo ao encontro da suposição inicial. Porém há uma redução gradativa na resistência a partir desta idade para todas as amostras até os 90 dias de reidratação. Este último comportamento se mostrou parte ou integralmente alternativo àquele citado na bibliografia de referência (ARAUJO , et al., 2007; ALMEIDA, 2017; CANOVAS, 1988; SOUZA & MORENO Jr., 2003;LIN, et al., 2009).</p>	
Figura 37 - Variação da resistência para o aquecimento a 300°C ao longo do processo de reidratação	67
Figura 38 - Variação da resistência para o aquecimento a 550°C ao longo do processo de reidratação	68
Figura 39 - Variação da resistência para o aquecimento a 800°C ao longo do processo de reidratação	69
Figura 40 - Evolução da fissuração ao longo das temperaturas ensaiadas CP-V ARI	72
Figura 41 - Evolução da fissuração ao longo das temperaturas ensaiadas CP-IV.....	72
Figura 42 - Evolução da fissuração ao longo das temperaturas ensaiadas de acordo com modo de resfriamento.	73
Figura 43 - Variação da degradação em função da posição dentro da mufla.....	73
Figura 44 - Variação de cor do concreto a 300°C	74
Figura 45 - Variação da cor do concreto a 550°C	75
Figura 46 - Variação da cor do concreto a 800°C	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Reações identificadas por análise térmica em pasta de concreto.....	22
Quadro 2 - Traços dos concretos ensaiados	27
Quadro 3 - Comparação das resistências residuais entre o concreto com e sem reidratação pós-fogo.....	33
Quadro 4 - Variáveis empregadas do estudo.....	39
Quadro 5 - Caracterização físico-química do aglomerante	40
Quadro 6 - Caracterização física do agregado graúdo.....	41
Quadro 7 - Caracterização física do agregado miúdo.....	41
Quadro 8 - Caracterização físico-química da água.....	41
Quadro 9 - VPU residual ao longo dos ensaios	54
Quadro 10 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento ao ar ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-IV	55
Quadro 11 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento ao ar ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-V ARI	55
Quadro 12 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com água ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-IV	55
Quadro 13 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com água ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-V ARI	56
Quadro 14 - Percentuais médios da VPU original apresentadas pelos concretos ao longo dos processos de reidratação	58
Quadro 15 - Resultados da variação do índice de absorção e índice de vazios.....	59
Quadro 16 - Resumo tratamento ANOVA para significância variável temperatura na redução da massa.....	63
Quadro 17 - Percentual de redução na resistência à compressão sob diferentes processos	64
Quadro 18 - Resumo tratamento ANOVA para significância variável temperatura na redução da resistência.....	65
Quadro 19 - Resistências estimadas versus resistências encontradas (valores em MPa)... Erro! Indicador não definido.	
Quadro 20 - Resistências percentuais médias apresentadas pelos concretos ao longo do estudo	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados unitários ensaios lote 01 (aglomerante: CP-IV; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24h)	83
Tabela 2 - Média e desvio padrão resultados dos ensaios do Lote 01 (aglomerante: CP-IV; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 s.....	83
Tabela 3 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 02 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 horas).....	84
Tabela 4 - Média e desvio padrão (DP) resultados dos ensaios do Lote 02 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 horas)	85
Tabela 5 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 03 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar e água; tempo de reidratação: 30 dias)	86
Tabela 6 - Média e desvio padrão (DP) resultados dos ensaios do Lote 03 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar e água; tempo de reidratação: 30 dias)	87
Tabela 7 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 04 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar e água; tempo de reidratação: 90 dias)	88
Tabela 8 - Média e desvio padrão (DP) resultados dos ensaios do Lote 04 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar e água; tempo de reidratação: 90 dias)	89
Tabela 9 - Resultados unitários dos ensaios de absorção de água e índice de vazios	90
Tabela 10 - Médias e desvio padrão (DP) dos ensaios de absorção de água e índice de vazios	91
Tabela 11 - Análise ANOVA sobre variação da massa ao longo da variação das temperaturas ensaiadas	92
Tabela 12 - Análise ANOVA sobre variação da resistência mecânica ao longo da variação das temperaturas ensaiadas	93
Tabela 13 - Análise ANOVA sobre variação da VPU mecânica ao longo da variação do processo de resfriamento	94
Tabela 14 - Análise ANOVA sobre variação da resistência mecânica ao longo da variação do aglomerante conjugado com o processo de resfriamento	96

LISTA DE SIGLAS

CPs – Corpos de prova.

f_{cj} – Resistência média a compressão do concreto a j dias de idade.

C-S-H – Silicatos de cálcio hidratados.

a/c – Proporção de água para cada unidade de cimento.

$C_6AS_3H_{32}$ – etringita.

$Ca(OH)_2$ – hidróxido de cálcio (portlandita).

CaO – óxido de cálcio (cal virgem).

$CaCO_3$ – carbonato de cálcio.

CO_2 – dióxido de carbono.

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – gesso

FeS_2 – pirita

VPU – Velocidade de pulso ultrassônico.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	13
2.1	QUESTÃO DE PESQUISA	13
2.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	13
2.2.1	Objetivo principal	13
2.2.2	Objetivos secundários	13
2.3	HIPÓTESE	13
2.4	PREMISSA	14
2.5	DELIMITAÇÕES	15
2.6	LIMITAÇÕES	15
2.7	DELINEAMENTO	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	O INCÊNDIO	17
3.1.1	Propagação do calor	19
3.1.2	Modelagem do incêndio	19
3.2	O CONCRETO	20
3.2.1	Efeitos de altas temperaturas sobre o concreto	20
3.2.1.1	<i>Efeitos na pasta de cimento</i>	20
3.2.1.2	<i>Efeitos no agregado</i>	23
3.2.1.3	<i>Efeito nos vazios</i>	23
3.2.1.4	<i>Efeito na macroestrutura</i>	24
3.2.1.5	<i>Efeitos sobre as propriedades</i>	25
3.3	PROCESSOS DE RESFRIAMENTO	30
3.4	O PROCESSO DE REIDRATAÇÃO	32
3.4.1	Análise comparativa entre os resultados apresentados	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CPs)	39
4.2	PROCESSO DE AQUECIMENTO	46
4.3	PROCESSO DE RESFRIAMENTO	47
4.4	PROCESSO DE REIDRATAÇÃO	49
4.5	PROCESSO DE VERIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES MICRO ESTRUTURAIS ..	50
4.6	PROCESSO DE VERIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES MACRO ESTRUTURAIS	51
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
5.1	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	53
5.1.1	Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)	53
5.1.2	Ensaio de absorção de água	58
5.1.3	Resistência mecânica	60
5.1.3.1	<i>Efeito da Temperatura</i>	61
5.1.3.2	<i>Efeito do Resfriamento</i>	66
5.1.3.3	<i>Efeitos da Reidratação</i>	67
5.2	ANÁLISE MACROESTRUTURAL	71
5.2.1	Propagação de Fissuras	71
5.2.2	Variação de cor	74

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6.1	CONCLUSÕES	76
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	80
8	ANEXO A	83

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de incidentes provocados pelo fogo é um risco potencial que todas as construções ao longo da história foram expostas em maior ou menor grau, porém sempre presente, representando trágicas consequências àqueles envolvidos.

Os incêndios em prédios de madeira eram costumeiros na Europa do século XV, mas os danos eram menores comparados com os anos que sucederam a Revolução Industrial, quando prédios industriais, comerciais e residenciais mesclavam-se na massa das grandes cidades, fruto da urbanização desordenada, aumentando sistematicamente o perigo e danos causados pelos incêndios à medida que o crescimento avançava (CARVALHO, 2001).

As primeiras orientações relacionadas aos materiais empregados e configuração das edificações apontam para Londres, no ano de 1666, quando um incêndio de grandes proporções atingiu a cidade. Tais regulações repercutiram em normativas que buscavam a prevenção de incêndios em diversos países nos anos posteriores. Nos anos de 1900, empresas de seguros provocaram o prólogo da pesquisa científica da resistência de elementos estruturais sujeitos aos efeitos do fogo, resultando na ASTM E-119, primeira norma regulamentadora de ensaios de resistência ao fogo, no ano de 1911 (CARVALHO, 2001).

O concreto produzido pela mistura de cal e pozolana natural empregado pelos romanos desde o ano IV A.C. não possuía resistência que propiciasse o seu uso em elementos estruturais. Foi o estudo de Joseph Aspdin que culminou na patente em 1824 do material denominado cimento Portland, o qual forneceria ao concreto resistência suficiente para o emprego em peças estruturais. A patente para emprego do concreto em construções é registrada no ano de 1854 e no ano de 1860 o material já era utilizado em elementos estruturais na Inglaterra, porém seu uso ainda não era disseminado, sobretudo como um material resistente ao fogo (DORFMAN, 2003).

Os primeiros estudos apontando para as características favoráveis do concreto frente ao fogo remetem a trabalho publicado em 1877 pelo advogado Thaddeus Hyatt, no qual, entre outras conclusões, atesta o material como resistente ao fogo, indicando seu uso não apenas para edificações, mas também para construção de abrigos (KAEFER, 1978).

No Brasil a produção científica direcionada à segurança contra incêndio é recente apresentando uma organização neste direcionamento a partir da instituição de normas brasileiras e uma legislação que teve por base instruções técnicas específicas de segurança contra incêndio e pânico consagradas por postulados internacionais. Destaca-se também a criação de cursos de pós-graduação voltados para a área. Todavia aqui o incremento na pesquisa ainda movimenta-

se aos saltos, principalmente motivadas por incidentes de grande repercussão (SEITO, et al., 2008).

As construções realizadas em concreto apresentam eficiência no que se refere à resistência ao incêndio dado seu perfil próprio que alia baixa condutividade térmica e incombustibilidade a estruturas de maior massa e menor volume comparativamente a elementos metálicos, por exemplo, somando-se a característica do material não exalar gases tóxicos quando exposto ao fogo (METHA & MONTEIRO, 2014). Porém, ao ser imerso num ambiente de altas temperaturas, o concreto sofre uma redução do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, resultando no decréscimo da sua rigidez. Os efeitos danosos do calor no concreto partem das diferenças individuais apresentadas por seus constituintes (pasta e agregados) dando origem a uma degradação desigual do material. Eventuais características da pasta, como a alteração na porosidade resultante de adições para aumento de resistência e o teor de umidade presente, potencializam esta deterioração, ofertando a possibilidade de colapso parcial ou total às estruturas de concreto (NEVILLE, 1997).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos internacionalmente a fim de reduzir a probabilidade de riscos à vida humana, fornecendo critérios de segurança que os tornem aceitáveis pelos usuários das edificações, visto o imperioso que a construção mantenha sua unidade estrutural no caso de um sinistro pelo tempo necessário a evacuação dos ocupantes e, preferencialmente mantenha uma integridade após a extinção do fogo, minimizando as avarias e possibilitando assim sua recuperação (ARAUJO et al., 2007).

Em situações reais de combate de um incêndio, utiliza-se água para resfriar e conseqüentemente cancelar a reação química em cadeia que alimenta um incêndio. Em alguns pontos, entretanto, onde a queima total do material combustível já tenha ocorrido quando os esforços para extinção das chamas tiverem início, o resfriamento pode acontecer de forma natural.

Alguns estudos apontam que a técnica de resfriamento (ao natural ou durante uma atividade de combate com água) influencia nas propriedades residuais de concretos expostos a um elevado gradiente térmico (XIAO & KÖNIG, 2004). Estudos também apontam para a tendência de reidratação de concretos, expostos a elevadas temperaturas, após um determinado período de tempo e replicação dos processos de cura após o sinistro, permitindo a recuperação de uma parcela das propriedades mecânicas perdidas (ARAUJO et al., 2007).

No intuito de fornecer dados no âmbito dessa linha de pesquisa, o presente estudo apresenta uma análise baseada no comportamento mecânico e os aspectos macroestruturais de um

concreto imerso em um ambiente de temperaturas compatíveis com situações de incêndio real e posteriormente submetido a técnicas distintas de resfriamento.

Em nível de controle serão analisados os efeitos do emprego de diferentes aglomerantes na resistência residual pós-exposição ao calor. Também serão estudados elementos que ampliem o conhecimento sobre a influência do processo de cura para recuperar parte do desempenho mecânico original do concreto, perdido durante o sinistro, considerando as técnicas de resfriamento adotadas.

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: como, comparativamente, as diferentes técnicas de resfriamento e reidratação de um concreto exposto a um gradiente térmico de altas temperaturas, influenciam nas suas propriedades mecânicas?

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 do trabalho é o comparativo das alterações macroestruturais e do comportamento mecânico do concreto quando reidratado de formas distintas (ao ar no ambiente e úmida) após exposição a altas temperaturas e diferentes formas de resfriamento.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

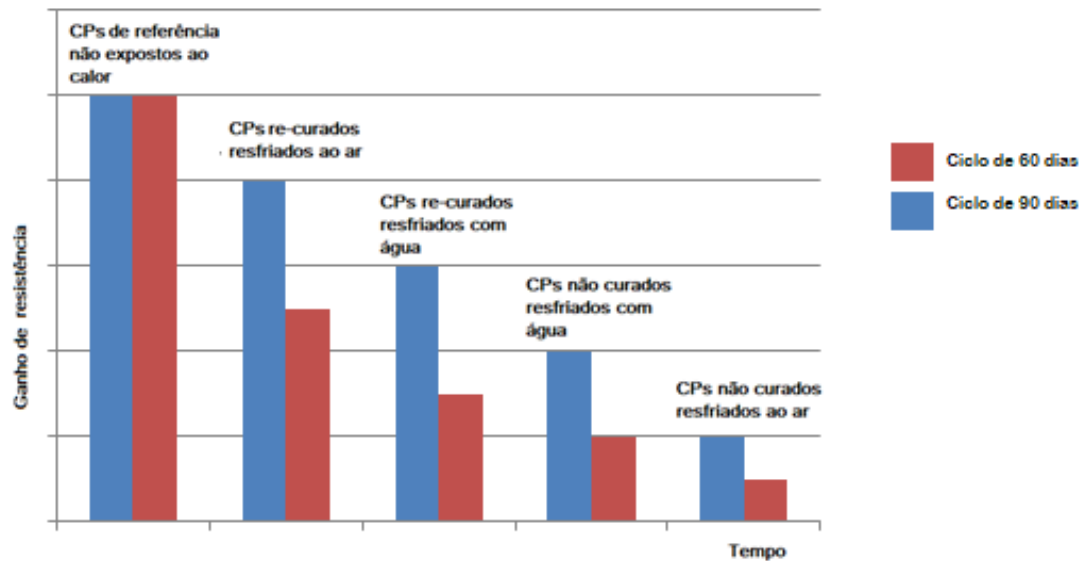
- a) Comparação de dois resfriamentos distintos, ao ar e com uso de água, tendo em vista que estas duas técnicas são as mais empregadas no cotidiano de elementos aquecidos, principalmente em situações de sinistro atendidas pelo Corpo de Bombeiros.
- b) Comparação da resistência residual entre concretos fabricados com aglomerantes distintos após exposição a altas temperaturas.

2.3 HIPÓTESE

O trabalho parte da hipótese que os efeitos danosos serão maiores naqueles corpos de prova que foram submetidos a temperaturas mais elevadas, somados às tensões geradas pelo choque térmico naqueles corpos de prova submetidos ao resfriamento rápido com água, comparativamente com aqueles que foram expostos a temperaturas mais baixa e resfriados ao ar. A figura 01 indica qualitativamente uma previsão do ganho de resistência após a exposição às altas temperaturas, resfriamento e processo de reidratação.

Análise experimental da influência da técnica de resfriamento, tipo e período de cura em elementos de concreto submetidos a um gradiente de altas temperaturas

Figura 1 - Hipótese de resposta dos CPs após ensaios.



(Fonte: elaborado pelo autor)

Com base nos resultados de ARAUJO (2007), embora os efeitos do choque térmico resultem em uma maior fissuração, a água do resfriamento também seria responsável em parte do processo de reidratação do cimento, fato que confere uma maior resistência residual aqueles concretos resfriados com água, sem procedimentos de nova cura, em comparação àqueles resfriados ao ar, sem emprego de uma nova cura.

De maneira inversa, nos concretos submetidos ao processo de reidratação, a fissuração causada pelo resfriamento com água não seria compensada, visto que os CPs irão dispor da umidade ofertada pela nova cura, resultando numa menor resistência final para aqueles resfriados com água.

Também é esperado que os concretos submetidos ao maior ciclo de reidratação (90 dias) apresentarão uma maior resistência do que os submetidos ao menor ciclo (30 dias).

2.4 PREMISA

O trabalho tem como premissa que, dentro dos padrões de segurança, a redução do custo e resíduos obtidos ao recuperar elementos danificados como opção a simples substituição total das estruturas sinistradas é válida perante aspectos financeiros, ambientais e sociais.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a analisar os efeitos da técnica de resfriamento e da influência processo de reidratação na recuperação da resistência mecânica apenas do material concreto submetido a altas temperaturas, visto que a estrutura real é composta por mais materiais que de forma integrada fornecem sua estabilidade mecânica, como por exemplo, o aço no concreto armado.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

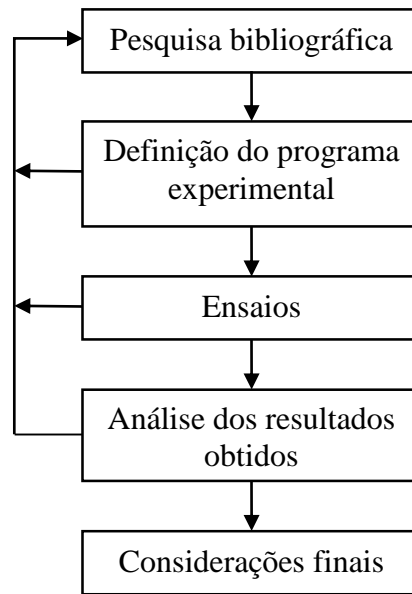
- a) Concreto simples, traço 1:2,9:3,6:0,65 (cimento, areia, brita, água);
- b) Processos de resfriamento com água e ao ar;
- c) Temperaturas de exposição de 300°C, 550°C e 800°C;
- d) Tempo de maturação após da exposição ao calor de 24 horas, 30 e 90 dias;
- e) Uso de cimentos CP-IV e CP-V;
- f) Processos de cura se utilizando apenas da umidade presente no ar e cura em câmara úmida.

2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas no diagrama da figura 02 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Definição do programa experimental
- c) Ensaio e coleta de resultados;
- d) Análise dos resultados obtidos através dos ensaios;
- e) Considerações finais e conclusões.

Figura 2 - Diagrama do delineamento do trabalho



(Fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente realizou-se a pesquisa bibliográfica, buscando conhecimento mais aprofundado do assunto proposto neste estudo, objetivando alcançar a compreensão dos fenômenos decorrentes do aquecimento do concreto a altas temperaturas. O estudo foi realizado por meio de uma pesquisa do tema em livros, publicações em revistas, trabalhos acadêmicos e sites específicos de material acreditado. Cabe salientar que pesquisa acompanhou todo o transcurso de construção desse trabalho em razão da extensão, particularidades e melhor entendimento dos resultados obtidos no decorrer da investigação.

Após o aporte de conhecimento básico do comportamento do concreto e aquilo que deveria ser investigado para aquisição de informações que corroborassem o objetivo anteriormente apresentado, foram definidas as condições de contorno para este fim. Dentre as infinitas variáveis, foram elencadas aquelas que seriam mais significativas, pertinentes e exequíveis para realização do estudo.

O próximo passo foi modelagem dos corpos de prova e realização dos ensaios para obtenção de dados para análise comparativa entre o que foi proposto pela bibliografia e os resultados mostrados pelos testes efetuados.

Por fim foi realizada análise dos resultados, a qual serviu de subsídio para as considerações finais do trabalho.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os assuntos que serviram de base para a construção do trabalho, obtidos durante a pesquisa bibliográfica realizada.

Iniciando com os fundamentos incêndio e do fogo, seguido dos efeitos sobre as propriedades mecânicas, microestrutura e a macroestrutura do concreto quando submetidos a elevadas temperaturas.

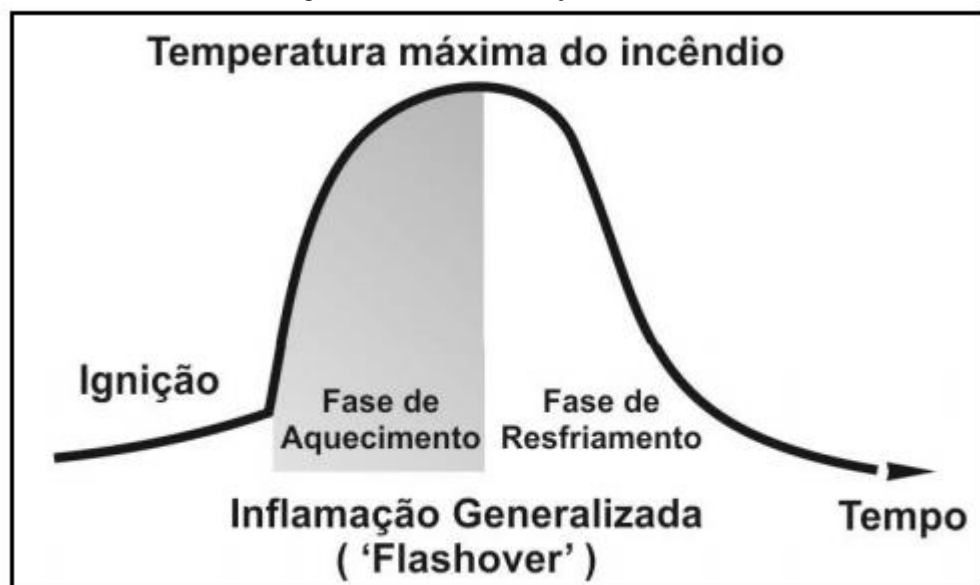
3.1 O INCÊNDIO

Incêndio (do latim *incendĭum*) é denominado a ação do fogo de grandes proporções, a qual destrói algo que não estava destinado originalmente para ser queimado. Um incêndio resulta de uma situação onde o fogo atua sem controle, resultando em risco aos seres vivos, bem como construções ou qualquer estrutura (HOUAISS, 2009).

Durante uma ocorrência de incêndio o gradiente térmico é uma decorrência dos gases aquecidos, os quais somados as labaredas presentes promovem a emissão de calor radioativo e convectivo (DIAS, 1998). O aumento na temperatura do concreto se dá pelo trânsito de calor condutivo do interior do elemento (LANDI, 1986).

Um incêndio pode ser discriminado por três estágios elementares conforme figura 03.

Figura 3 - Curva de evolução do incêndio



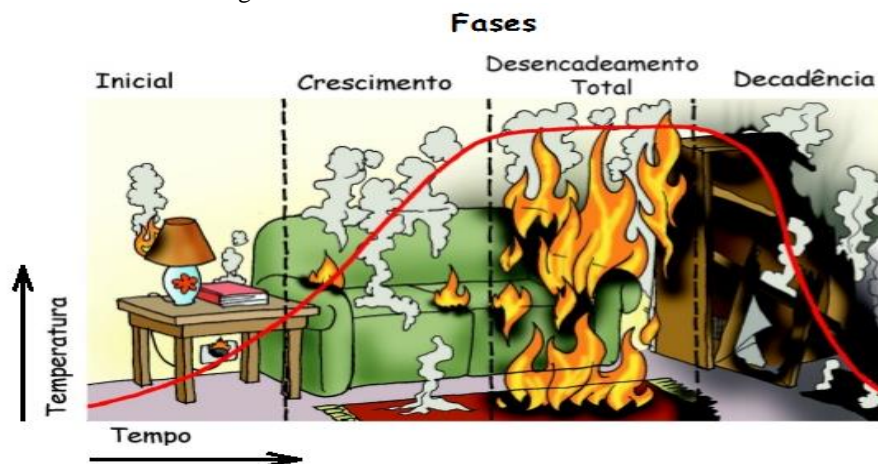
(Fonte: Instrução técnica nº 02/2011 – Corpo de Bombeiros de São Paulo, 2011)

A primeira fase a qual sucede a ignição é aquela compreendida entre o momento que a chama adquire capacidade de manter-se e o ponto denominado inflamação generalizada (*flash over*). Nesta etapa o risco representado pelo fogo ainda é reduzido, sendo as condições de contorno, como material combustível ou ventilação do ambiente são uma variável de menor relevância. Haverá uma mobilização reduzida para o controle do incêndio e após sua extinção não haverá a necessidade de conferência da integridade estrutural (PURKISS, 2007).

A segunda fase é determinada por uma grande elevação da temperatura a um patamar acima de 300°C num curto período de tempo, podendo atingir 1000°C em função da quantidade e do material combustível disponível. Nessas condições o fogo já se classifica como fora de controle, consumindo todo combustível do local no processo de combustão. Haverá significativa mobilização de esforços para extinção das chamas nessa fase com efetivo risco a vida e comprometimento dos materiais acometidos pelo fogo. Será necessária uma investigação para averiguar o comprometimento estrutural sofrido pelos elementos expostos a esta fase do incêndio (DINENNO, et al., 2002).

A terceira e última fase é aquela onde ocorre o resfriamento do ambiente e estruturas sinistradas visto que todo material combustível ou comburente já foi consumido pelo fogo. Nesta fase os esforços para extinção completa das chamas vão progressivamente diminuindo à medida que o local esfria. O risco a vida é representado pela presença de elementos passíveis de colapso estrutural, emanção de vapores tóxicos, pela baixa concentração de oxigênio que poderá causar asfixia ou de explosão (*backdraft*) caso um súbito volume de oxigênio seja ofertado ao ambiente. Será necessária uma investigação para averiguar o comprometimento estrutural sofrido pelos elementos expostos até esta fase do incêndio (DINENNO, et al., 2002). A figura 04 ilustra esquematicamente as fases do incêndio.

Figura 4 - Processo evolutivo de um incêndio



(Fonte: PETROBRAS - Manual de orientações da brigada de incêndio, 2011)

3.1.1 Propagação do calor

Durante um incêndio o sistema busca encontrar uma situação de equilíbrio. O calor gerado pelo fogo é propagado para outras regiões que apresentem contiguidade térmica no entorno do sinistro na busca do equilíbrio térmico. A troca de energia térmica das zonas com uma maior atividade térmica (mais aquecidas) para aquelas com uma atividade térmica mais reduzida (mais frias) ocorre por três formas distintas de propagação, condução, convecção e radiação.

- Condução - Nesta forma de transferência a energia é transferida pelo contato entre as moléculas de através de um meio físico sem trânsito de matéria;
- Convecção – Esta forma de transferência de energia ocorre quando uma interface aquecida transfere energia para o fluido na qual está imersa.
- O processo de propagação do calor por radiação e aquele onde a energia é transferida por meio de ondas eletromagnéticas emanadas de um corpo irradiante para aqueles ao seu redor, sem a necessidade de um meio físico entre estes eles, inclusive no vácuo.

3.1.2 Modelagem do incêndio

Para verificação da segurança estrutural, no caso de incêndio, a ocorrência deverá ser modelada seguindo critérios técnicos para que seja possível estimar os danos causados sobre os elementos estruturais e dimensioná-los de forma a atender o estado limite último da edificação.

O modelo de incêndio natural tem como base sistemas matemáticos e ensaios reais que levam em conta variáveis próprias do incêndio, como quantidade de combustível, ventilação do ambiente, entre outros. Este modelo recebe o nome de curva de incêndio natural, caracterizado pela presença de dois ramos distintos, um de ascensão e outro declínio da temperatura na fase de resfriamento do incêndio (figura 07). Porém com a aleatoriedade destas variáveis, para cada ocorrência, se convencionou o uso de uma curva padrão para a realização de ensaios (SILVA, 2001).

A norma RILEM 129-MHT, (2004) tem sido à base de orientação na modelagem dos ensaios para determinação da resistência residual em CPs de concreto submetidos a altas temperaturas (CASTILLO & DURANI,1990 apud ALMEIDA, 2017; POON et al,2001, apud ALMEIDA, 2017; ANNEREL & TAERWE, 2008,apud ALMEIDA, 2017; LI et al., 2014; SANTOS, 2012). Nestas pesquisas foram utilizadas taxas de aquecimento lineares, na faixa de 1°C a 9°C/minuto, que segundo a norma, são mais adequadas aos estudos com foco nas propriedades

do material concreto (ALMEIDA, 2017) e não da estrutura construídas com o material em si, para as quais a curva temperatura tempo dos gases ISO 834 é a mais adequada.

3.2 O CONCRETO

O concreto de cimento Portland é o material mais utilizado, a nível mundial, para construção de peças estruturais na atualidade. É inorgânico, não metálico, estável quimicamente, possui temperatura de fusão elevada, boa características tanto de isolamento térmico quanto elétrico, porém apresenta baixa ductilidade, que o torna um material frágil.

3.2.1 Efeitos de altas temperaturas sobre o concreto

O concreto é um material heterogêneo, neste sentido sua constituição é fator importante, pois tanto a pasta de cimento quanto o agregado consistem de componentes que se decompõem quando expostos aos efeitos do aquecimento durante um incêndio, resultando em reações que dependerão da composição química, das propriedades térmicas e mecânicas próprias de cada componente. Além destas, as características da macroestrutura do concreto como permeabilidade e tamanho da peça, por exemplo, influenciarão no resultado final após o aquecimento a altas temperaturas (CARVALHO, 2001).

Ensaio promovidos na busca de estabelecer o efeito da exposição do concreto a elevadas temperaturas, apresentaram resultados muito diferentes em função da grande gama de variáveis envolvidas, impossibilitando uma generalização do assunto, uma vez que os resultados devem ser interpretados sob a ótica das condições de contorno de cada ensaio (NEVILLE, 1997).

O desempenho real de um concreto sujeito a um gradiente alta temperatura é o resultado de inúmeros fatores complexos interagindo simultaneamente dificultando uma investigação apurada. No entanto, uma dissecação do material, buscando os efeitos do calor em cada um dos seus componentes é uma forma de alcançar um melhor entendimento da reação do concreto ao calor (COSTA & SILVA, 2002).

3.2.1.1 Efeitos na pasta de cimento

O grau de umidade e hidratação da pasta de concreto serão fatores que ditarão sua resposta frente ao calor. Um material saturado apresentará uma grande quantidade de água em todas as formas, a qual será sistematicamente perdida com a elevação da temperatura.

A pasta não apresentará alterações significativas até o patamar de 40°C, além desta temperatura é verificado a desidratação da etringita ($C_6AS_3H_{32}$), a qual representa de 15% a 20% do volume total de sólidos na pasta, sendo uma das responsáveis pela pega e formada nos primeiros

instantes de hidratação do cimento. Quando a temperatura chega a 100°C toda a etringita da pasta foi decomposta (VIEIRA & ISHIKAWA, 2000).

O calor de vaporização necessário para mudança de fase da água resulta num elemento de proteção para o concreto, uma vez que será necessário atingir a temperatura de evaporação da água na sua constituição para que ocorra o aumento de temperatura do concreto, que ocorrerá a partir de 100°C. São verificados efeitos próprios, resultantes da dificuldade em extrair-se cada um dos tipos de água presente (METHA & MONTEIRO, 2014):

- Água capilar: localizada nos poros com dimensão maior que 50 Å, é rapidamente evaporada a temperatura máxima de 100°C, pois não recebe influência das paredes dos sólidos. A parcela contida nos grandes vazios (maior que 50 nm) não promove alterações no volume final quando removida, já a parcela presente nos capilares menores (5 a 50 nm) promoverá uma retração na pasta em função da presença de tensão capilar;
- água absorvida: localizada próxima à superfície dos sólidos, aderida à pasta por força de atração. Esta água é perdida até temperaturas de 300°C. Uma porção desta água também é removida por secagem quando a umidade relativa atinge 30%, promovendo retração da pasta;
- Água interlamelar ou de gel: é a água que hidrata o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). É perdida quando as temperaturas atingem a faixa de 300°C a 400°C, ou por processo intenso de secagem, quando a umidade relativa encontra-se abaixo de 11%. Sua perda resulta em considerável retração da estrutura dos silicatos.
- Água quimicamente combinada: é a água ligada a muitos produtos da hidratação do cimento, sendo perdida quando estes são decompostos no aquecimento a partir de 300°C. Esta parcela da água não é perdida na secagem.

Entre o intervalo de 200°C a 300°C, o processo de evaporação das primeiras parcelas de água é finalizado, sem resultar em maiores alterações na estrutura do cimento hidratado ou perda considerável de resistência. De 300°C a 400 °C a perda de água interlamelar resulta no comprometimento da estrutura dos C-S-H. Como o C-S-H representa de 50 a 60% do volume de sólidos, sendo o responsável pela maior parte da resistência do concreto, a sua desidratação resulta na fragilização do material, fomentando o aparecimento de fissuras. Nesta faixa de temperatura também ocorrerá a redução de parte da água quimicamente combinada do C-S-H e dos sulfoaluminatos hidratados (METHA & MONTEIRO, 2014).

Na faixa de temperaturas entre 400°C e 600°C ocorrerá a desidratação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) resultando na formação de óxido de cálcio (CaO) o qual ficará exposto a um novo

processo de hidratação, visto que é altamente reativo com água. Como este componente representa de 20 a 25% do volume de sólidos do concreto e apresenta uma reação expansiva na ordem de 40 a 100% em contato com a água, poderá promover o aparecimento de fissuras.

Na faixa de temperaturas ente 650°C e 750°C ocorrerá a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), encontrado na pasta, proveniente do calcário adicionado ao cimento, ou da carbonatação do concreto. Acima da temperatura de 800°C, a pasta de cimento pode sofrer reações de vitrificação, que apresenta potencial para nova hidratação dos compostos cimentícios após o resfriamento, nesta temperatura o concreto apresenta cerca de 20% da resistência inicial. A decomposição completa dos silicatos ocorrerá na faixa de temperaturas entre 700°C e 900°C. As partículas anidras não são afetadas pela variação da temperatura, permanecendo inalteradas (VIEIRA & ISHIKAWA, 2000).

O quadro 01 resume a reação dos componentes da pasta através da análise da temperatura.

Quadro 1 - Reações identificadas por análise térmica em pasta de concreto.

Temperatura de pico [°C]	Reação
40 – 100	Decomposição da etringita
100 – 200	Início da evaporação da água capilar
200 – 300	Evaporação da água capilar e adsorvida
300 – 400	Evaporação da água interlamelar Desidratação do C-S-H
400 – 600	Desidratação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$
650 – 750	Decomposição do CaCO_3
> 800	Provável vitrificação
700 – 900	Decomposição completa de toda massa de C-S-H

(Fonte: elaborado pelo autor)

O processo de evaporação da água resulta num aumento da pressão de vapor no interior dos poros. Em massas de concreto muito compactas, a taxa de aumento da pressão interna poderá superar a taxa de liberação do vapor, visto a baixa porosidade do material, resultando em lascamentos superficiais ou no fenômeno do deslocamento explosivo (*spalling*), logo nos primeiros 30 minutos do incêndio (PHAN, et al., 1997).

O deslocamento explosivo é uma ocorrência muito danosa para as estruturas, uma vez que resulta na perda de partes da peça, expondo a armadura e as camadas internas do concreto

diretamente às chamas. Buscando reduzir o risco de ocorrência de *spalling*, o Eurocode¹ impõe um limite de 3% no teor de umidade para concretos comuns (LINDGARD & HAMMER, 1998).

3.2.1.2 Efeitos no agregado

Os materiais utilizados como agregados na produção do concreto representam uma média de 70% do volume final da mistura, por esta razão é fundamental avaliar seu desempenho frente a um gradiente de temperaturas em elevação. Como estão sujeitos a expansões térmicas, em maior ou menor grau de acordo com a natureza física e mineralógica, com potencial de impacto danoso as estruturas, os componentes representativos de cada agregado deverão ser avaliados em função do tipo de concreto que será fabricado (METHA & MONTEIRO, 2014).

Agregados que apresentam quartzo em sua matriz, tais como granitos e basaltos, sofrem uma transformação em temperaturas acima de 570°C, onde o quartzo da fase alfa se reorganiza de forma abrupta numa fase beta mais volumosa (pipocamentos), podendo resultar na fragmentação do concreto onde está inserido (COSTA & SILVA, 2002).

Agregados de matriz calcária apresentam expansões para temperaturas acima de 650°C. Nestas temperaturas ocorre a decomposição CaCO_3 , com a liberação de dióxido de carbono (CO_2) e resultando em CaO , altamente hidrófilo, podendo apresentar expansão na ordem de 40% quando reidratado ocasionando fissuras no concreto onde está inserido. O CO_2 , liberado no processo de calcinação, apresenta a característica de criar uma película com propriedades de isolamento térmico na superfície do agregado, retardando os efeitos das chamas no componente (COSTA & SILVA, 2002).

Uma característica comum a todos os agregados está ligada a sua porosidade, independente de sua constituição mineral. O percentual de poros presentes no material é diretamente proporcional à ocorrência de expansões destrutivas resultantes de pipocamentos, fragmentando o agregado juntamente com a matriz cimentícia que o envolvia (METHA & MONTEIRO, 2014).

3.2.1.3 Efeito nos vazios

A existência de vazios na matriz dos concretos terá um impacto direto nas suas propriedades mecânicas. À medida que a porosidade do material aumenta, se verifica um declínio na resistência a compressão do mesmo.

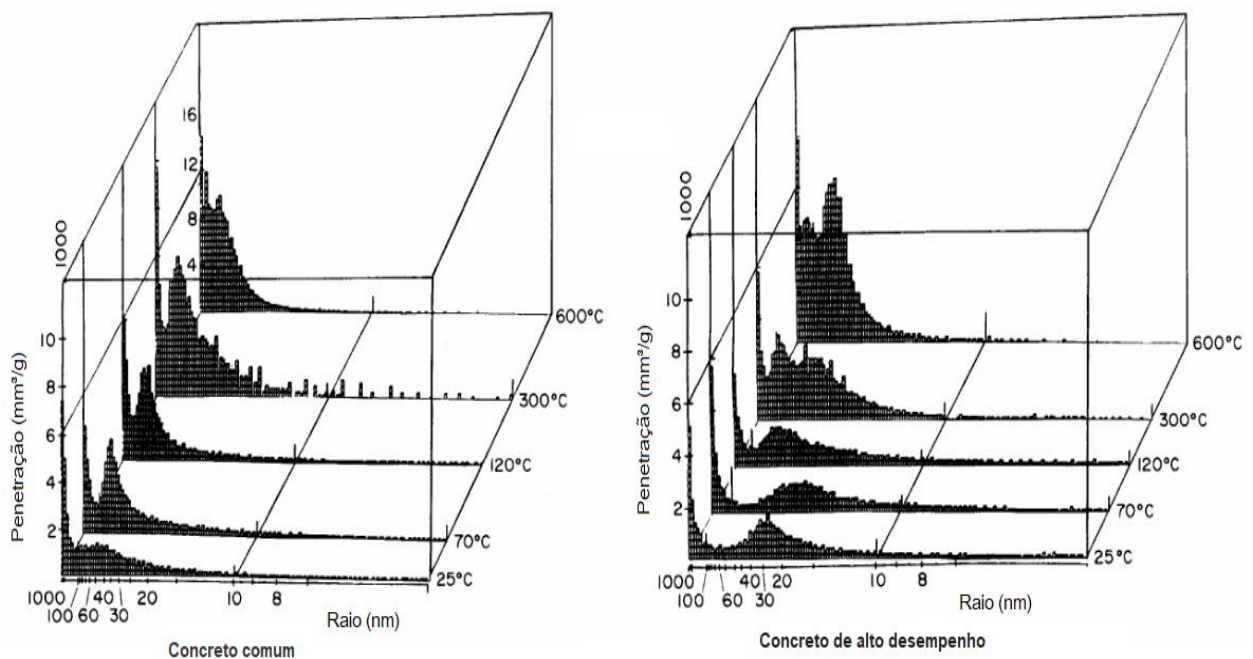
¹ Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General Rules – Structural fire design

Como é verificada a presença de porosidade em todos os componentes da mistura, além da presença de vazios na zona de transição entre os materiais, o aquecimento induz mudanças micro estruturais sentidas de forma global em todo o concreto.

Observa-se um aumento na porosidade no momento que se inicia a evaporação da água contida nos poros e daquela que hidratava os silicatos de cálcio hidratados. A partir do limite de 300°C o índice de vazios é influenciado pela decomposição dos sólidos citada anteriormente. Além do patamar de 500°C, os efeitos adversos do calor são sentidos pela estrutura de forma mais intensa em função da perda de estabilidade de alguns agregados, que somará mais uma parcela a porosidade do material, aumentado pelo surgimento de microfissuras resultantes do deslocamento relativo entre agregados e pasta de cimento (ANDRADE, et al., 2003).

A figura 05 mostra o crescimento dos poros resultante da elevação das temperaturas de 25°C para 600°C em dois tipos de concretos.

Figura 5 - Evolução da porosidade decorrente da temperatura



(Fonte: Adaptado NOUMOWE, et al., 1996).

3.2.1.4 Efeito na macroestrutura

Uma avaliação visual é o ponto de partida para a análise de uma estrutura exposta a um incêndio. Ela se inicia com a associação da perda de resistência com a alteração na cor do concreto. Os componentes ferrosos dos agregados siliciosos e calcários mudam sua coloração à medida que são aquecidos, permitindo estimar a máxima temperatura atingida e a perda de resistência associada. Porém concretos constituídos por agregados com outra mineralogia podem não apresentar alterações, impossibilitando esta avaliação (CANOVAS, 1988).

O concreto apresentará cor cinza até a temperatura de 200°C, não ocorrendo reduções de resistência relevantes. Para temperaturas de 300 a 600°C, o concreto apresenta tons de vermelho e rosa, apresentando reduções na ordem de 50% a 90% do valor inicial. Ao serem atingidas temperaturas de 600°C a 900°C, o concreto voltará a sua cor cinza, porém apresentando machas avermelhadas, significando que a resistência atingiu 10% do valor original. Atingido os valores de 900°C a 1000°C, o concreto apresentará tons amarelo alaranjado, ocorrendo à sinterização do material. A partir de 1000°C, a cor amarela se torna mais clara, não sendo mais registrada resistência residual do concreto (CANOVAS, 1988).

Em pesquisa realizada junto ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) apresentou como resultado um percentual de 72% de correlação da cor verificada naqueles concretos submetidos a altas temperaturas com a previsão de sua resistência mecânica residual, no modelo utilizado, sendo este uma variável relevante para avaliação de estruturas sinistradas (WENDT, 2006). Neste estudo não foram verificados os tons róseos e vermelhos previsíveis para faixa de temperatura entre 300°C e 600°C, todavia foi encontrado correlações entre as cores previstas por CANOVAS (1988) para as demais faixas de temperaturas. A autora ressalta ainda a influência dos agregados (gráudo e miúdo) no resultado final da cor, com o clareamento do granito utilizado como agregado gráudo e escurecimento da areia, esclarecendo que estes resultados foram de encontro a literatura sobre o tema.

A imersão da estrutura de concreto num ambiente com temperaturas em elevação resultará na desidratação e retração dos seus elementos cimentícios, por evaporação da água. De forma antagônica neste cenário, os agregados entrarão num processo de expansão. A sobreposição destes efeitos acaba por gerar tensões sobre a estrutura que acabam fissurando a pasta de cimento, levando a perda de resistência (CARVALHO, 2001).

A presença de armadura, sobre certas circunstâncias, torna mais prejudicial os efeitos da temperatura. Nos casos de fissuração onde haja perda de cobrimento e exposição do metal ao ambiente aquecido, a armadura passará a servir de vetor que propagará o calor para o interior do concreto, propagando os efeitos danosos de forma generalizada por toda peça (NEVILLE, 1997).

3.2.1.5 Efeitos sobre as propriedades

Estudos mostram que concretos imersos num ambiente com aumento crescente da temperatura sofrerão uma redução contínua e progressiva da resistência, sendo mais afeados aqueles constituídos por uma mistura mais rica. A maior parcela das perdas na resistência a compressão são registradas

nas primeiras 2 horas de exposição do concreto a temperaturas superiores a 150°C. No entanto será verificada uma perda contínua de resistência, podendo o declínio alcançar um período de dois a 120 dias após o incêndio. Perdas na resistência a flexão são registradas a partir do momento que a temperatura começa a se elevar, com uma redução na ordem de 10 a 20% quando se chega a 100°C (DHIR, et al., 1999).

Concretos de alto desempenho também estarão sujeitos aos efeitos do deslocamento explosivo, potencializado quando a elevação ocorre de forma acelerada. Este fenômeno foi observado mesmo para relação água/cimento de 0,26, visto a baixa porosidade do material (NEVILLE, 1997). A figura 06 apresenta exemplos de deslocamento explosivo sofrido por pilares e lajes construído em concreto de alta resistência submetido a temperaturas de um incêndio típico.

Figura 6 - Exemplos de spalling explosivo após incêndio simulado
(a) deslocamento em laje (b) deslocamento em pilar de alto desempenho



(Fonte: Britez, 2011).

Conforme o aumento da temperatura avança durante o incêndio, pode ocorrer a perda de massa no concreto, causada, dentre outros motivos, pela fissuração provocada pelas tensões térmicas e pelo deslocamento em cantos e quinas de vigas e pilares, ocorrido entre 30 e 90 minutos iniciais do sinistro. Para uma temperatura de 70°C, se verifica uma integridade de 99% da massa original para todos os concretos. Para o intervalo de 70°C a 120°C, ocorre evaporação da água presente no concreto, acompanhado de uma retração na matriz cimentícia e fissuração da pasta de cimento. Quando a temperatura alcança o intervalo de 120°C a 350°C, dá-se a maior taxa de perda massiva decorrente da desidratação dos silicatos de cálcio hidratados. Além da temperatura de 350°C a perda massiva torna-se menos expressiva, sendo resultante da decomposição do Ca(OH)_2 , entre 400°C e 600°C e da decomposição do CaCO_3 , proveniente

do calcário adicionado ao cimento, quando a temperatura atinge valores entre 650°C e 750°C (VIEIRA & ISHIKAWA, 2000).

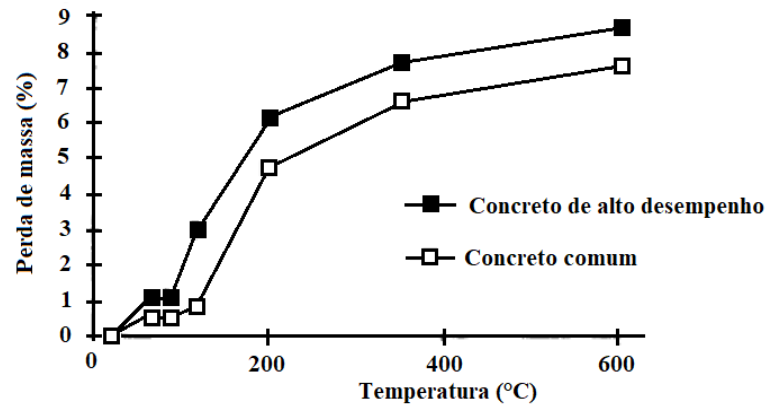
O quadro 02 apresenta dois traços de concreto, sendo o primeiro um concreto comum de relação água/cimento de 0,56 e resistência característica a compressão de 37 MPa e o segundo concreto de alto desempenho onde a relação água/cimento é de 0,60 e a resistência característica é de 57 MPa, os quais sofreram uma perda massiva apresentada na figura 07, após exposição a gradiente de temperaturas na ordem de 600°C.

Quadro 2 - Traços dos concretos ensaiados

Componentes	Concreto comum [kg]	Concreto de alto desempenho [kg]
Areia (0-5 mm)	771	782
Brita (5 -12,5 mm)	313	318
Brita (12,5 – 25mm)	787	815
Filler	0	57
Micro-sílica	0	40
Água	194	161
Cimento CPJ 55 PM	347	266
Plastificante	1,03	0
Redutor de água	0	9,08
Retardante de pega	0	0,93

(Fonte: Adaptado NOUMOWE, et al., 1996)

Figura 7 - Comparativo de perda de massa entre concretos expostos a altas temperaturas



(Fonte: NOUMOWE, et al., 1996)

Os pontos onde se verifica mudanças de inclinação sinalizam as temperaturas nas quais houve perdas massivas resultantes de mudanças de fases ou transformações químicas sofridas pelo concreto.

O cálculo da minoração da resistência do concreto em função da temperatura pode ser estimado por meio da equação 01, com valores do coeficiente redutor $k_{c,\theta}$ apresentados na figura 08.

$$f_{ck,\theta} = k_{c,\theta} * f_{ck,20^{\circ}C} \quad (01)$$

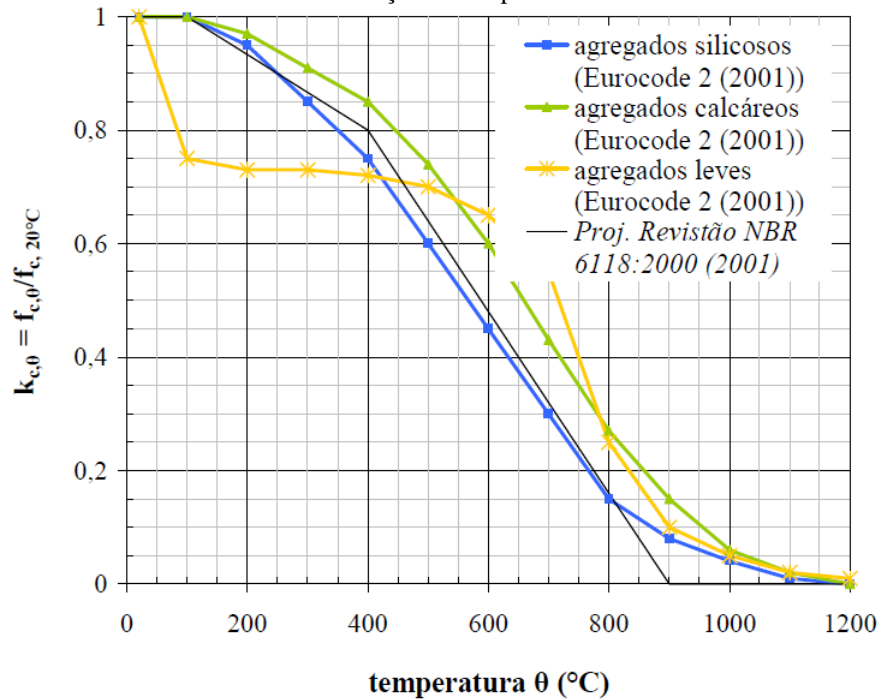
Onde:

$f_{ck,\theta}$ = resistência característica do concreto à compressão à temperatura elevada θ em °C [MPa];

$k_{c,\theta}$ = fator de redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura θ em °C;

$f_{ck,20^{\circ}C}$ = resistência característica do concreto à compressão à temperatura ambiente [MPa].

Figura 8 - Fator de redução da resistência do concreto a compressão em função da temperatura.



(Fonte: COSTA & SILVA, 2002).

Para estimar o valor da resistência de cálculo em função da temperatura θ [$^{\circ}\text{C}$] será utilizada a equação 02.

$$f_{cd,\theta} = k_{c,\theta} * \frac{f_{ck,20^{\circ}\text{C}}}{\gamma_c} \quad (02)$$

Onde:

$f_{cd,\theta}$ = resistência de calculo do concreto à compressão à temperatura elevada θ em $^{\circ}\text{C}$ [MPa];

$k_{c,\theta}$ = fator de redução da resistência à compressão do concreto em função da temperatura θ em $^{\circ}\text{C}$;

$f_{ck,20^{\circ}\text{C}}$ = resistência característica do concreto à compressão à temperatura ambiente [MPa];

γ_c = coeficiente de minoração da resistência característica do concreto à compressão em situação excepcional (no caso de incêndio o valor será menor que 1,4);

3.3 PROCESSOS DE RESFRIAMENTO

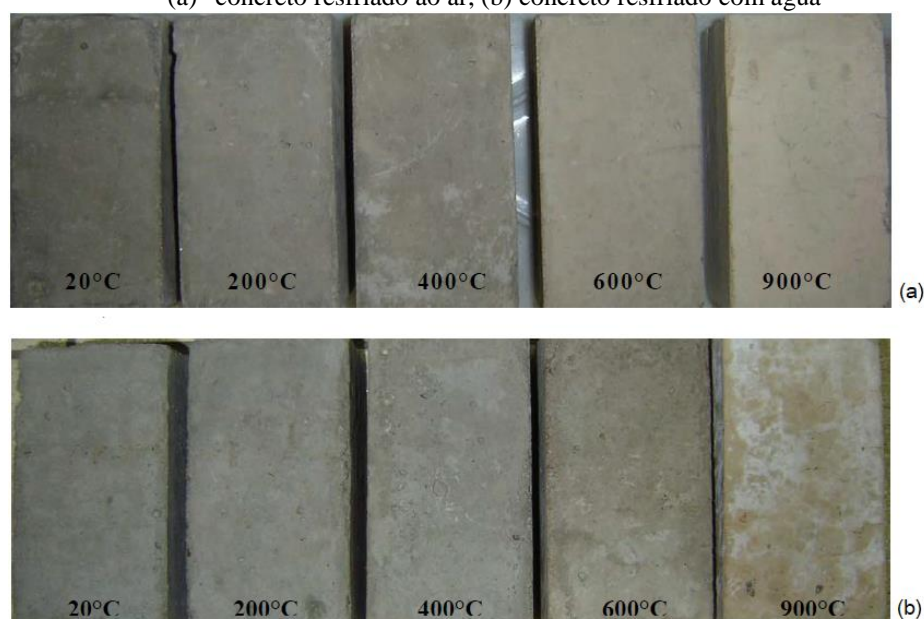
O modo como o concreto é resfriado, somado a temperatura em que se encontrava o material no momento que se inicia a perda de transferência de energia térmica para o meio terão efeitos diretos sobre a resistência residual do material.

O resfriamento realizado de forma lenta resultará em menores danos a elementos sinistrados uma vez que o material terá tempo para sua reordenação estrutural equilibrada, ofertando um alívio de tensões linear, minimizando a propagação de fissuras (COSTA & SILVA, 2002).

O resfriamento lento dentro do forno é o menos prejudicial para a resistência residual do concreto, uma vez que os gradientes térmicos são menores. Estudos em concretos resfriados lentamente ainda dentro da câmara de combustão, após o aquecimento a temperaturas de 600°C, apresentarão perdas ainda menores do que os resfriados simplesmente ao ar em temperatura ambiente, evidenciando efeitos de choque térmico pela mudança súbita entre o interior do forno meio exterior, visto que há maior taxa de resfriamento no segundo caso (NEVILLE, 1997).

O modo como o concreto foi resfriado também resultara em efeitos na cor aparente do material, conforme apresentado a figura 09, onde as manchas claras naqueles concretos expostos a temperaturas mais altas e resfriados mais rápido com água são associadas a uma reidratação do CaO presente na mistura como resultado da decomposição do Ca(OH)_2 na faixa de temperaturas entre 400°C e 600°C (WENDT, 2006).

Figura 9 - Exemplo de cor resultando de processos distintos de resfriamento
(a) concreto resfriado ao ar, (b) concreto resfriado com água



(Fonte: WENDT, 2006)

Há um consenso entre os pesquisadores da área no sentido que independente do modo como o concreto é resfriamento, este processo implicará em soma dos danos apresentados pela estrutura

já comprometida (NASSIF, 2000; XIAO & KÖNIG, 2004; LUO et al., 2000, apud ALMEIDA, 2017), porém há outra linha de estudos que aponta poucas diferenças significativas entre as formas de resfriamento (LORENZON, 2014 apud ALMEIDA 2017; WENDT, 2006).

O processo de resfriamento rápido do concreto aquecido potencializará a redução da resistência causada pelo calor, sendo mais pronunciada na faixa de baixas temperaturas até 400°C, onde por meio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU), se verifica uma resistência residual em torno de 30% daquela original do concreto intacto. Estudos apontam que os efeitos danosos sobre um concreto aquecido a 250°C resfriado com água equivalem aos danos causados por uma temperatura de 350°C, porém resfriado ao ar (NASSIF, 2000).

Ainda segundo o autor, durante ensaios onde a temperatura externa alcançava 900°C, na faixa de 30,0 mm abaixo da face, posição mediana para o posicionamento das armaduras passivas, a temperatura média era de 500°C. Nesta situação, caso a face exterior seja submetida à aspersão de água dos bombeiros, por exemplo, este gradiente térmico é bruscamente revertido. O súbito desenvolvimento de um perfil não linear com reversão, através das camadas adjacentes resultaria no aumento do índice de fraturas internas daquele concreto.

O resfriamento rápido com uso de água na faixa de temperaturas até os 400°C resultariam em maiores perdas na resistência devido a maior quantidade de fissuras promovidas pelas tensões de tração geradas do momento do choque térmico ofertado pela água. Estas tensões são equivalentes para temperaturas superiores a 600°C, torando sua diferença insignificante (XIAO & KÖNIG, 2004).

Para concretos comuns expostos a faixa de temperatura entre 800°C e 1000°C o resfriamento rápido representa uma diminuição de 28,5% na resistência residual, frente aqueles que foram resfriados lentamente. Porém, ultrapassado aquele linear de temperatura o material se encontra tão severamente deteriorado, com resistência residual na ordem de 10%, que não apresenta alterações maiores promovidas pelos processos de resfriamento distinto. Nesta faixa de temperaturas, o resfriamento rápido também é responsável pelo aumento na porosidade total 35% superior ao resfriado lentamente (LUO et al., 2000 apud ALMEIDA, 2017).

Todavia alguns estudos apresentam uma linha alternativa de resultados ao apontar que o modo de resfriamento não influenciou de forma significativa o valor estatístico do módulo de elasticidade e da VPU, ao empregar-se processos de resfriamento lento ainda dentro do forno e rápido com aspersão de água (WENDT, 2006).

Outra pesquisa apontada pelo pesquisador foi realizada com um concreto comum de 20 MPa de resistência à compressão, a qual apresentou resultados de pouca expressão situando-se entre

10% e 18% de variação na resistência residual daquele concreto resfriado lentamente fora do forno, para o que foi resfriado num processo de com imersão em água (LORENZON, 2014 apud ALMEIDA 2017).

3.4 O PROCESSO DE REIDRATAÇÃO

A partir do entendimento dos mecanismos de desidratação seguida da decomposição do C-S-H, resultando na regressão do concreto aos componentes primitivos da sua constituição e com base nas características hidrofílicas do cimento são esperados resultados positivos no sentido de ganho de resistência através de um método no qual uma quantidade de água seja ofertada aquele concreto danificado, promovendo sua reidratação. Neste sentido submeter uma estrutura sinistrada a um processo de reidratação seria uma das formas de recuperar parte da resistência perdida.

Já foi verificado que uma parcela da água empregada no resfriamento rápido proverá a hidratação de uma porção do cimento presente no concreto, representando um aumento na resistência residual nos dias seguintes, enquanto que a resistência residual do concreto resfriado ao ar continuará a diminuir durante um período de tempo, e posteriormente irá recuperar lentamente (NEVILLE, 1997).

Maiores resistências à compressão foram encontradas para os casos de resfriamento com água do que para o resfriamento lento por SOUZA & MORENO Jr., (2003) em seus experimentos. O pesquisador avalia estes resultados com uma recuperação de resistência devido à possível reidratação do concreto quando imerso em água. Esse fato seria decorrência da metodologia do estudo, onde os CPs eram imersos por 30 minutos em água para o resfriamento mais rápido, enquanto o resfriamento lento era realizado com a imersões em torno de 2 minutos, tempo que não permitiria este fenômeno de reidratação.

O processo como se dará a recuperação da resistência apresentará formas distintas em função do modo de resfriamento que o concreto foi submetido (ALMEIDA, 2017). Na pesquisa deste autor realizada junto ao LEME, o concreto foi resfriado bruscamente por submersão ou lentamente permanecendo dentro do forno, onde foi apontado um ganho mais acentuado nos primeiros sete dias de reidratação para aqueles concretos resfriados com água, seguido de uma ligeira redução até o 28º dia, a partir do qual o concreto volta a recuperar resistência de uma forma mais lenta e regular. Um comportamento alternativo é verificado para os concretos resfriados ao ar, os quais primeiramente apresentam uma redução linear até o 28º dia de reidratação, passando a recuperar resistência desta data em diante.

São constatados efeitos de ganho de resistência após um processo de reidratação para diferentes condições de contorno, tais como relações água/cimento e temperatura a que o concreto foi exposto. Tal ganho de resistência é diretamente proporcional ao tempo que o concreto foi reidratado (LIN, et al., 2009).

Em pesquisa destes mesmos autores, onde foram utilizados dois tipos de concreto com 0,58 e 0,68 de relação água/cimento, expostos a temperaturas que variaram de 400°C a 600°C, o ganho de resistência residual advinda da reidratação foi progressivo conforme o tempo de cura que os concretos foram tratados, conforme apresentado ao quadro 03. No entanto, quando a temperatura de exposição foi superior a 800°C, foi relatada a não observação de melhorias na resistência residual proporcionada pela reidratação.

Quadro 3 - Comparação das resistências residuais entre o concreto com e sem reidratação pós-fogo.

Temperatura	Dias após aquecimento	Resistência para relação a/c = 0,58 [MPa]		Resistência para relação a/c = 0,68 [MPa]	
		Sem reidratação	Reidratado	Sem reidratação	Reidratado
400°C	7	27,3	32,4	19,2	25,6
	30	28,3	37,8	20,2	29,4
	90	28,1	42,4	19,7	31,8
	180	30,9	42,3	20,6	30,9
500°C	7	24,2	37,1	15,8	28,3
	30	23,3	40,2	14,9	30,0
	90	23,8	42,2	15,7	30,7
	180	24,6	40,1	15,9	29,0
600°C	7	7,5	25,6	4,3	20,4
	30	7,9	27,1	4,7	21,2
	90	10,1	27,4	4,2	20,2
	180	10,6	26,8	4,7	19,4

(Fonte: Adapato Lin et al., 2009)

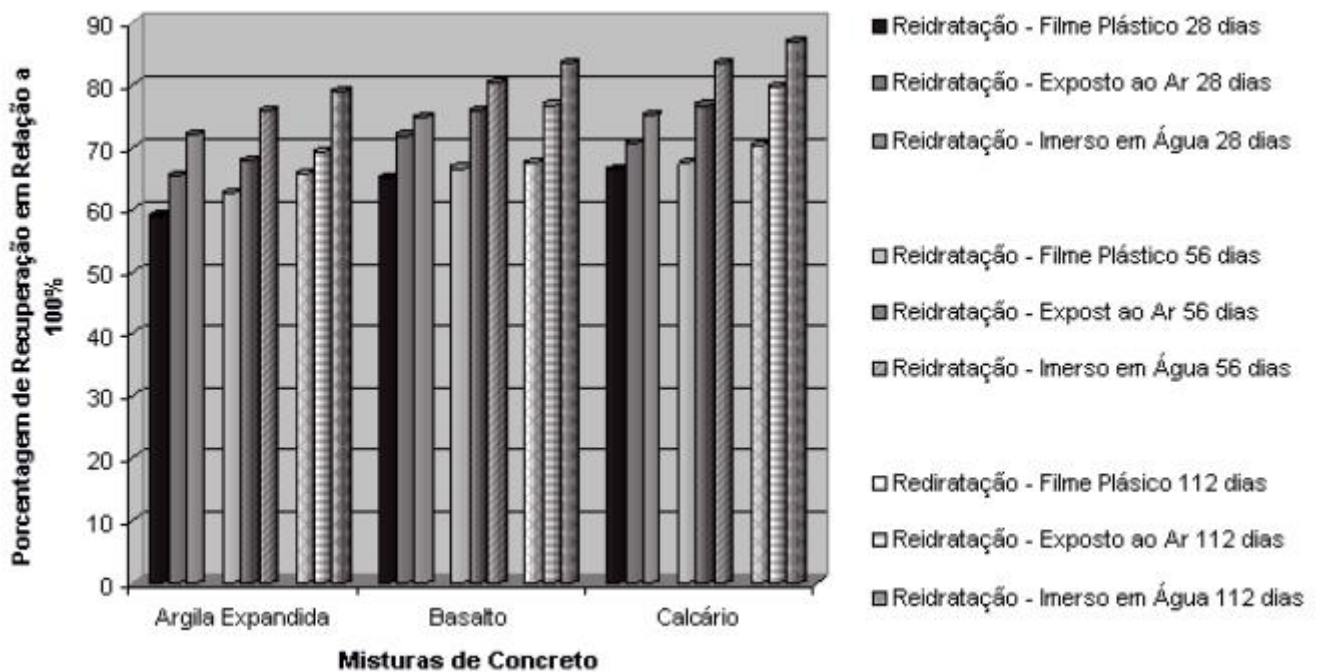
Os autores ainda ressaltam que a relação água/cimento não seria uma variável determinante no processo de recuperação de resistência, visto que para os dois traços houve um ganho de resistência em 83% dos grupos avaliados.

Os melhores resultados encontrados apontam para uma recuperação de até 90% da resistência para aqueles concretos produzidos com cimento CP-V, expostos a temperatura que não ultrapasse os 500°C, nos quais o processo de reidratação foi mantido durante o período de um ano (CANOVAS, 1988).

Outra variável a ser considerada será o processo como será conduzida a reidratação, uma vez que o procedimento empregado implicará de forma direta na recuperação da resistência.

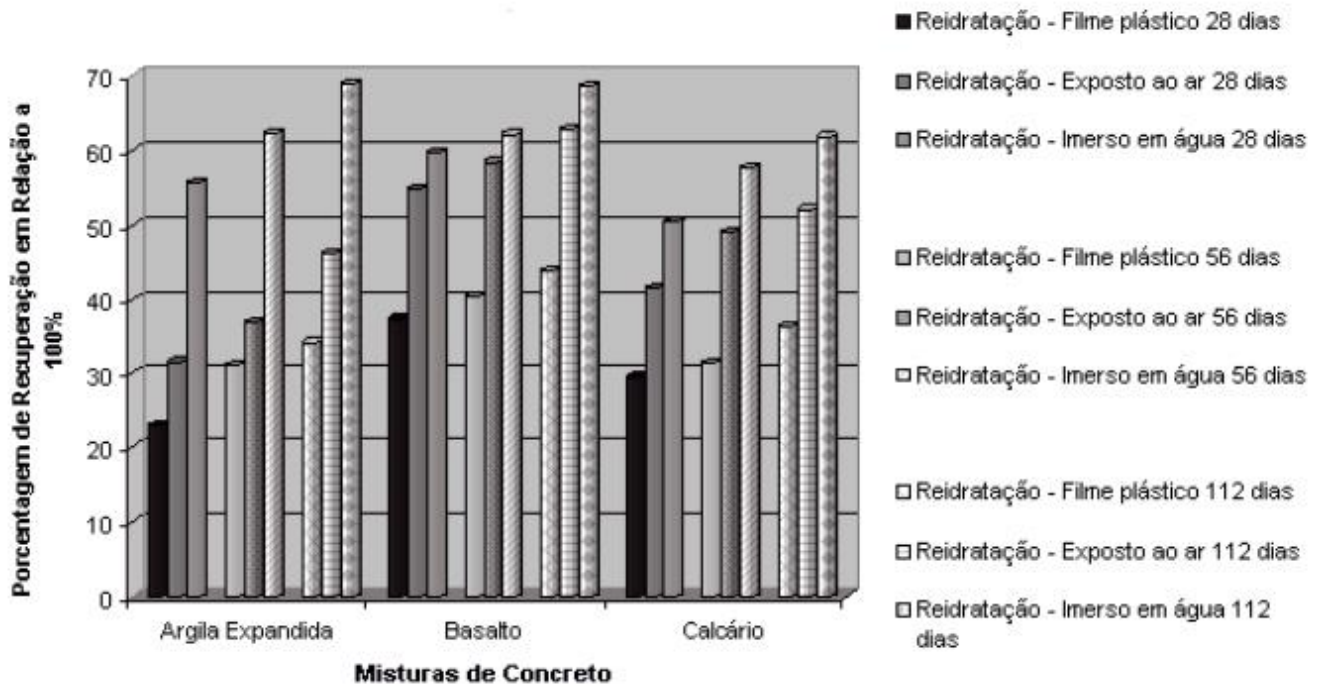
Um comparativo utilizando imersão em água e uso de filme plástico como meio de reidratação para concretos de diferentes agregados expostos a temperaturas de 300°C e 600°C vem ao encontro daquilo postulado por CANOVAS (1988) ao conseguir uma recuperação máxima da resistência à compressão próxima aos 90% para um concreto sujeito a 300°C, após reidratação por imersão num período de 112 dias, comparativamente à recuperação na faixa de 65% a 70% daqueles reidratados utilizando-se filme plástico, conforme apresentado nas figuras 10 e 11 (SOUZA & MORENO Jr., 2003).

Figura 10 - Resistência a compressão para concretos aquecidos a 300°C.



(Fonte: IBRACON, 2010)

Figura 11 - Resistência a compressão para concretos aquecidos a 600°C.



(Fonte: IBRACON, 2010)

Valores de recuperação inferiores foram verificados para temperatura acima de 500°C, bem como em outros estudos dos autores apontam uma recuperação da ordem de 45% naqueles concretos aquecidos até 800°C ao ser utilizado para o mesmo processo de reidratação durante o mesmo período de tempo, novamente confirmando os dados de CANOVAS (1988).

3.4.1 Análise comparativa entre os resultados apresentados

Neste ponto uma síntese com os resultados dos autores citados ao longo do capítulo se faz necessária com objetivo na construção de parâmetros para comparação entre os métodos utilizados e dados obtidos em seus estudos, com aqueles que serão originados neste trabalho.

ARAUJO et al. (2007) se utilizaram de dois traços na composição dos concretos de seu estudo, duas temperaturas iguais a 600°C e 900°C e dois processos de reidratação: em câmara úmida com ambiente de 100% de umidade, ao qual chamou de “natural” e imersão em solução de cal, ao qual chamou de “induzida”. Nos ensaios realizados a 900°C obteve como resultado ganhos contínuos na recuperação de resistência para o traço mais pobre e com maior relação a/c (0,7) em ambos os processos ao longo de 52 dias de reidratação, sendo 57% na média de recuperação no processo natural e 245% na média de recuperação no processo induzido, enquanto para o traço mais rico e com menor relação a/c (0,5) encontrou um crescimento gradual alcançando uma média de 20% de aumento na resistência residual até o 27º dia de reidratação, a partir do

qual houve uma redução da resistência chegado ao 52º dia com apenas 6% de aumento médio na resistência no processo natural. Porém, no processo induzido conseguiu um contínuo crescimento ao longo de todo o ciclo de reidratação, chegando ao fim deste com um aumento médio de 81% na resistência residual. Aos ensaios realizados na temperatura de 600°C foi verificada uma redução gradativa da resistência residual em todas as verificações para ambos os traços de concreto, chegando a 26% de média no processo natural. Contrariamente, o processo de reidratação induzida apresentou um ganho singular, porém contínuo ao longo das verificações, chegando a um acréscimo de 6% na resistência residual ao 52º dia de reidratação. ALMEIDA (2017) utilizou três traços de concreto em seu estudo, sendo um convencional servindo de controle e dois com adição de cinzas de casca de arroz distintas, três temperaturas de exposição (300°C, 400°C e 600°C), somado a dois modos de resfriamento distintos, mais rápido com uso de água e lento resfriado ao ar, reidratando os CPs em câmara úmida após a exposição as temperaturas, em um ambiente com 75% de umidade. Em seu estudo a temperatura de 600°C obteve como resultado uma redução média na resistência residual de 15,6% e 31,4%, respectivamente, para o concreto convencional e aquele com adição, resfriados ao ar nos primeiros 28 dias de reidratação, a partir do qual passou a apresentar uma recuperação da resistência chegando a um ganho de 31% e 24%, respectivamente, para o concreto convencional e com adição aos 154 dias de reidratação. Os concretos resfriado com água apresentaram resultados antagônicos, sendo que houve um ganho de resistência superior a 50% para todos os traços aos primeiros 7 dias de reidratação, a partir dessa idade a resistência começou a apresentar um declínio contínuo, chegando a uma redução na ordem de 7,4% e 5,7% para os concreto convencional e com adição, respectivamente, aos 28 dias de reidratação, mantendo-se desta idade em equilíbrio até o 154º dia de reidratação.

SOUZA & MORENO Jr., 2003 empregaram três traços distintos variando a proporção e o tipo de agregado (argila expandida, basalto e calcário), mas mantendo a mesma relação a/c (0,57) e as temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C. Como processo de reidratação foram utilizados três processos, envoltórios dos CPs com filme plástico, imersão em água a temperatura ambiente e exposição apenas à umidade presente no ar. Este trabalho apresentou um ganho contínuo de resistência para todos os traços e durante todas as verificações para os três processos de reidratação, destacando-se o concreto que utilizou argila expandida como agregado. Os resultados deste estudo a temperatura de 300°C apresentam uma recuperação média deste concreto de 68%, 50% e 60%, respectivamente, para concretos envoltos em filme, expostos ao ar e imersos em água, aos 28 dias de reidratação; 72%, 81% e 89%, na mesma ordem citada anteriormente, aos 56 dias de reidratação e 82%, 89% e 93%, na mesma ordem de processos,

aos 112 dias, indo ao encontro do postulado por CANOVAS (1988) para recuperação de resistência após um ano de reidratação para concretos expostos a temperaturas até 300°C. É citado em seu trabalho que os concretos expostos a 600°C e 900°C obtiveram uma recuperação máxima de 85% e 45%, respectivamente, no processo de reidratação por imersão em água.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A literatura consultada sobre o tema deste estudo, em sua maior parte (COSTA & SILVA, 2002; ALMEIDA, 2017; CARVALHO, 2001; METHA & MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 1997; ANDRADE, et al., 2003; HERTZ, 1999; NOUMOWE, et al., 1996; WENDT, 2006; XIAO & KÖNIG, 2004), se baseia na pesquisa modelada de um regime permanente de temperatura, ou seja, oferta-se uma taxa de calor fixa ao elemento até que seja atingido um patamar pré estabelecido, a partir do qual a temperatura é mantida constante durante todo o período do ensaio. Esta conformação não é aquela verificada na ocorrência real de um sinistro, onde elevadas temperaturas são ofertadas aos elementos de concreto em curtos períodos de tempo a taxas variáveis de aquecimento. Outras observações pertinentes se referem ao fato das câmaras de aquecimento utilizadas nos trabalhos citados não conseguirem entregar as taxas de aquecimento preconizadas pelas curvas de incêndio padronizadas. Também foram verificados diferentes patamares de temperatura de exposição dos CPs e períodos de tempo nos processos de cura e reidratação.

Neste sentido, visando contornar esta limitação de padronização nas pesquisas, objetivando uma base comparativa dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles que serviram de subsídio, foram elencadas as condições de contorno com similaridade no maior número de estudos e dentro das condições físicas disponíveis, sem fugir do escopo da pesquisa.

Do exposto, a metodologia experimental empregada visa avaliar as propriedades mecânicas, bem como caracterizar a micro e macroestrutura de um concreto convencional, submetido a um regime transiente da temperatura ambiente até aquelas avaliadas. Para isto, os CPs sofreram um aquecimento linear até determinados patamares pré-definidos a partir dos quais as amostras foram resfriadas de duas formas, sendo posteriormente divididos em lotes utilizados nos ensaios pertinentes a esta etapa do estudo, bem como destinados aos diferentes processos de reidratação. Finalizada esta fase, os CPs foram avaliados para coleta final de resultados que serviriam para verificar a eficácia dos processos na recuperação de parte daquela resistência do concreto perdida ao longo do experimento.

O quadro 4 apresenta um resumo das condições de contorno elencadas para o estudo.

Quadro 4 - Variáveis empregadas do estudo.

Variáveis de entrada	Condições de contorno
Temperatura de exposição [°C]	300, 550 e 800
Processo de resfriamento	Ao ar e com água
Processos de reidratação	Por absorção de umidade natural do ar e cura úmida
Períodos de reidratação	90 dias, 30 dias e 24 horas ²
Aglomerante	CP IV e CP V-ARI
Agregado graúdo	Brita basáltica nº1
Agregado miúdo	Areia quartzosa média lavada
Traço (cimento: brita: areia: relação a/c)	1,0 : 3,6 : 2,9 : 0,65
Variáveis de saída	Resultados
Avaliação microestrutural	VPU, ensaio de resistência a compressão e ensaio de absorção de água
Avaliação macroestrutural	Análise visual de fissuração e variação da cor

(Fonte: elaborado pelo autor)

4.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (CPs)

Para o estudo foram moldados conjuntos de CPs destinados a cada processo de reidratação previsto (figura 12), resultando num total de 144 peças divididas em quatro lotes:

- Lote 1 – processo de reidratação de 24 horas ao ar, confeccionado com CP-IV;
- Lote 2 – processo reidratação de 24 horas ao ar, confeccionado com CP-V ARI (o qual juntamente com o lote 1 também serviu de balizamento do estado no qual se encontrava o concreto logo após exposição as temperaturas);
- Lote 3 – processo de reidratação de 30 dias, confeccionado com CP-V ARI;
- Lote 4 – processo de reidratação de 90 dias, confeccionado com CP-V ARI;

Figura 12 - Lote representativo do conjunto de CPs que foi ensaiado para um processo de reidratação



(Fonte: autor do estudo)

² Neste período de reidratação os CPs não foram expostos ao processo de cura úmida.

Com objetivo de evitar, ou minimizar a possibilidade de eventuais deslocamentos explosivos (*spalling*), os CPs foram confeccionados com um traço que resultaria num concreto de resistência compreendida na faixa do grupo I normatizada pela NBR ABNT 6118/14 (20 a 50MPa), a qual abrange uma grande quantidade das peças estruturais de concreto empregadas na construção civil, e conseqüentemente, com maior probabilidade de exposição a ocorrências de incêndio.

O traço unitário do estudo foi fornecido pelo LEME, consistindo na proporção 1,0:3,6:2,9:0,65 (cimento, brita, areia, relação água/cimento), com o qual se buscou uma resistência à compressão de entre 25 a 30 MPa na idade de 28 dias.

Os insumos utilizados (figura 13) também foram fornecidos pelo laboratório LEME, sendo descritos a seguir, com suas respectivas caracterizações³ apresentadas aos quadros 05 a 08.

- Aglomerante: cimento Portland pozolânico (CP-IV);
cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V ARI), marca Nacional;

Quadro 5 - Caracterização físico-química do aglomerante

Parâmetro	Resultados	Exigência de norma
Finura de Blaine	4401 cm ² /g	≥ 3000 cm ² /g
Massa específica	3,11 g/cm ³	---
Diâmetro médio	11,56 µm	---
Perda ao fogo	2,56 %	≤ 4,5 %
CaO	68,11 %	---
Al ₂ O ₃	1,92 %	---
MgO	1,49 %	≤ 6,5 %
SO ₃	3,02 %	≤ 4,5 %
Tempo de início da pega [min]	140 minutos	≥ 60 minutos
Tempo de término da pega [min]	187 minutos	≤ 600 minutos

(Fonte: Almeida, 2017)

³ Não foi apresentada a caracterização do cimento CP-IV do estudo uma vez que foi utilizada uma carga residual disponível junto ao depósito do LEME;

- Agregado graúdo: brita basáltica nº01, oriunda da região metropolitana de Porto Alegre/RS;

Quadro 6 - Caracterização física do agregado graúdo

Abertura da peneira	Retido	Retido acumulado
25 mm	0 %	0 %
19 mm	5 %	5 %
12,5 mm	75 %	80 %
9,5 mm	19 %	99 %
6,3 mm	1 %	100 %
≤ 6,3 mm	0 %	100 %
Caracterização física		
Diâmetro máximo característico	19 mm	
Módulo de finura	7,04	
Massa específica	2,91 g/cm ³	

(Fonte: Almeida, 2017)

- Agregado miúdo: areia quartzosa média natural lavada, oriundo do rio Jacuí, RS;

Quadro 7 - Caracterização física do agregado miúdo

Abertura da peneira	Retido	Retido acumulado
6,3 mm	0 %	0 %
4,75 mm	0 %	0 %
2,36 mm	4 %	4 %
1,18 mm	10 %	14 %
0,60 mm	30 %	44 %
0,30 mm	45 %	89 %
0,15 mm	0 %	89 %
≤ 0,15 mm	11 %	100 %
Caracterização física		
Diâmetro máximo característico	2,36 mm	
Módulo de finura	2,40	
Massa específica	2,63 g/cm ³	

(Fonte: Almeida, 2017)

- Água: água potável fornecida pelo DMAE à temperatura ambiente;

Quadro 8 - Caracterização físico-química da água

Parâmetro	Resultados	Exigência legal
Cloro	0,56 mg/L	≥ 0,2 mg/L
Fluoretos	0,72 mg/L	0,6 a 0,8 mg/L
PH	8,23	6,0 a 9,5
Cor	< 2,5 UH	< 15,0 UH
Turbidez	0,47 UT	< 5,0 UT

(Fonte: DMAE, MAR/2018)

Figura 13 - Material pesado para um traço

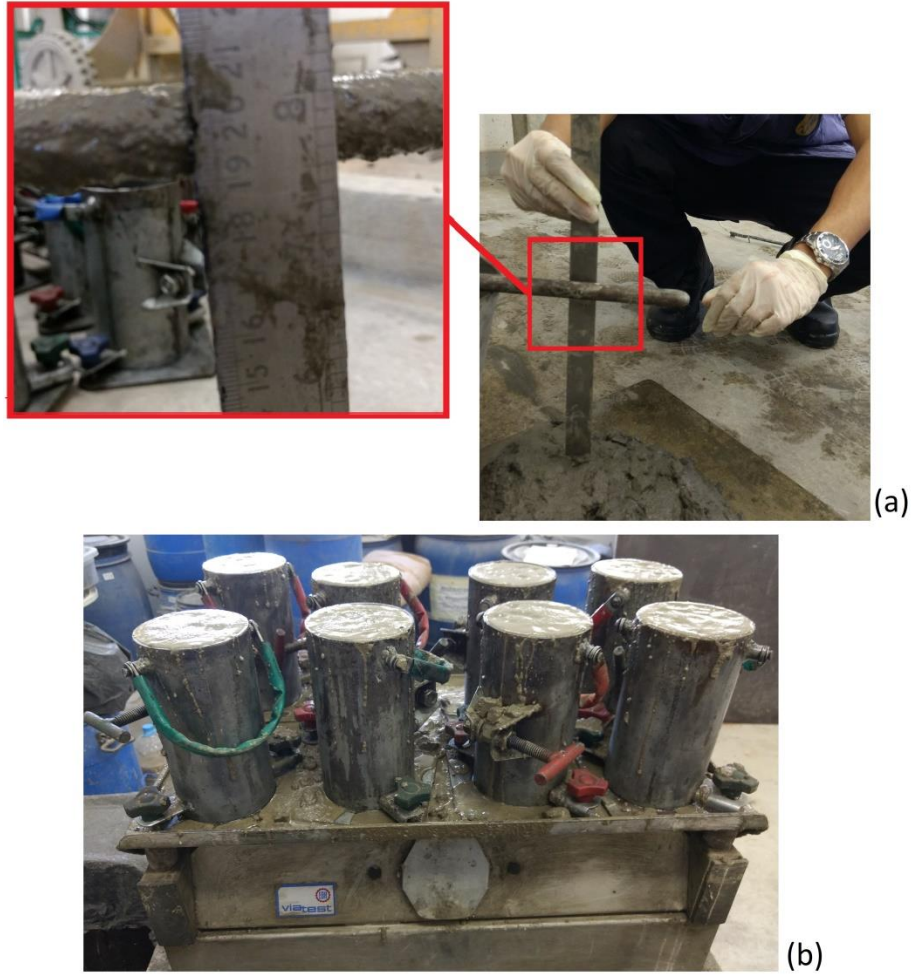


(Fonte: autor do estudo)

O concreto foi misturado com o uso de uma betoneira de tombo com volume igual a 400 litros, com abatimento igual a 20 ± 2 cm, envasado em moldes 10x20cm (diâmetro, altura) e adensamento realizado em mesa vibratória, conforme apresentado a figura 14.

O processo de cura se deu primeiramente com os CPs deixados cobertos com lona, em repouso à temperatura ambiente dentro do laboratório por 24 horas após o molde. Finalizada esta etapa, os CPs foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida com temperatura de $23^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade de 100% até a idade de sete dias (figura 15). Após este tempo, foram retirados da câmara úmida, retificados (figura 16) e, posteriormente, acondicionados em uma sala com temperatura média de 24°C e umidade média de 50% até a idade de 28 dias, quando foram realizados os primeiros ensaios de compressão e exposição às temperaturas do estudo. A caracterização dos CPs ao longo de todas as fases do estudo pode ser conferida junto ao Anexo A.

Figura 14 - (a) Verificação do abatimento, (b) adensamento com uso de mesa vibratória.



(Fonte: autor do estudo)

Figura 15 - Lote de CPs acomodado na câmara úmida



(Fonte: autor do estudo)

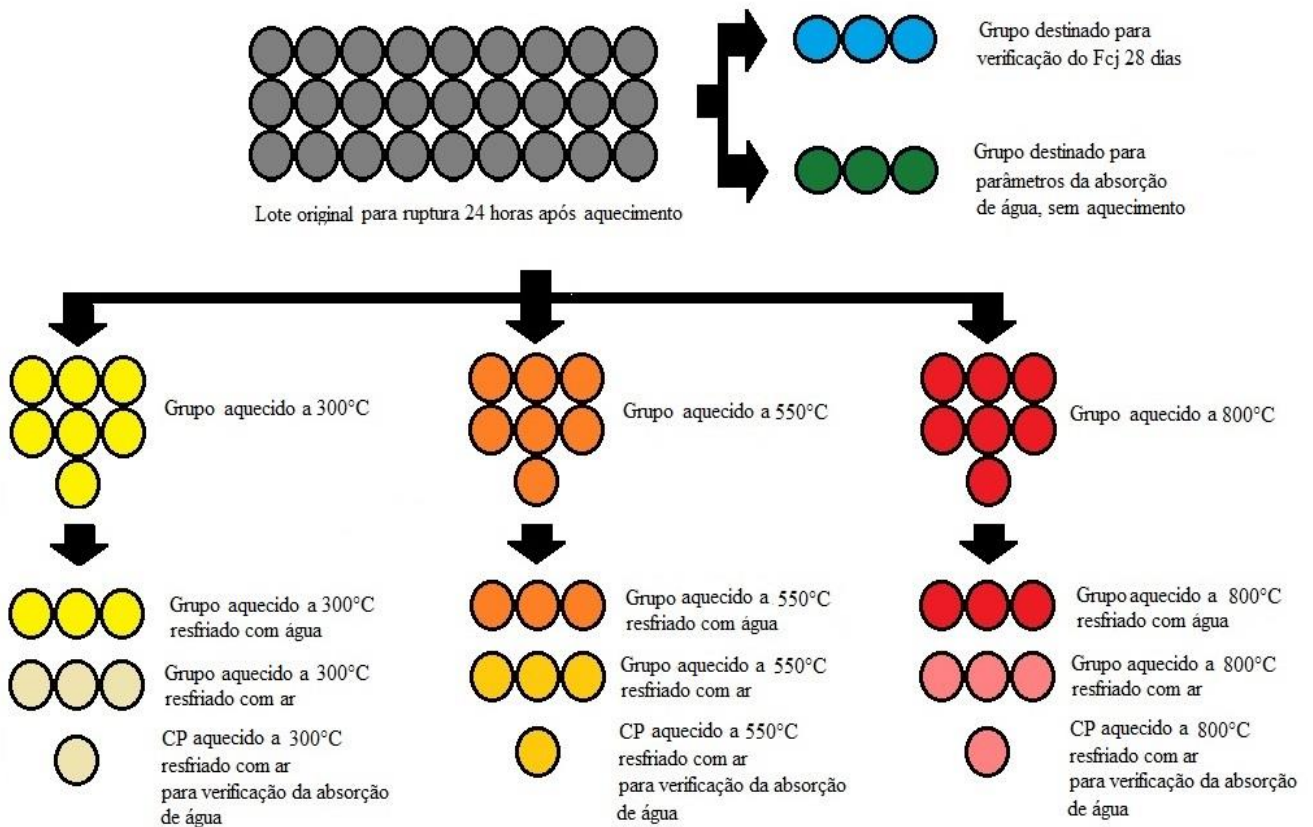
Figura 16 – Processo de retificação dos CPs



(Fonte: Autor do estudo)

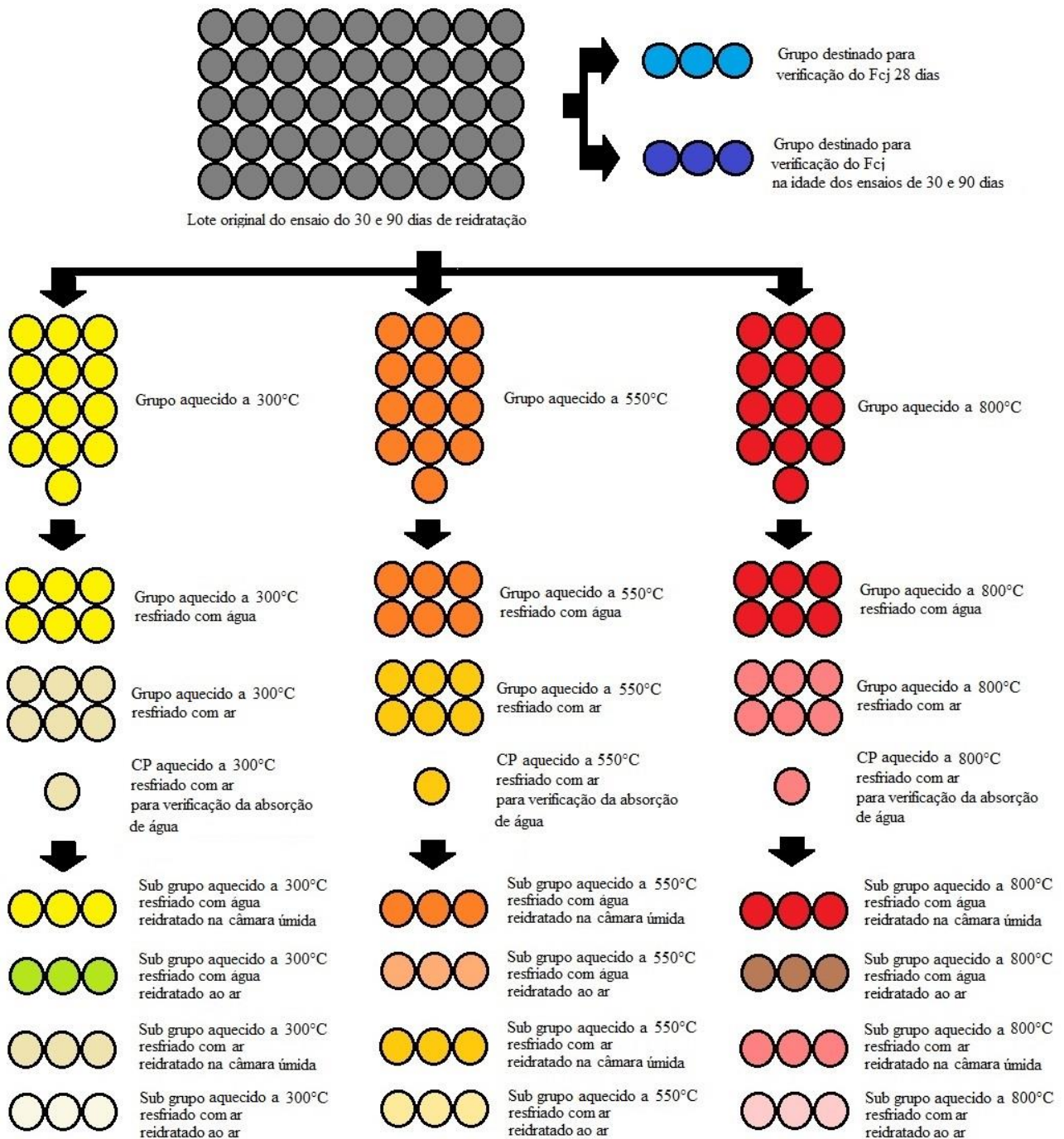
As figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, um resumo dos processos e composições de cada grupo de CPs ensaiados 24 horas após o aquecimento e aquelas ensaiados após 30 e 90 dias de reidratação.

Figura 17 - Composição dos grupos de CPs sem reidratação



(Fonte: autor do estudo)

Figura 18 - Lotes de CPs reidratados a 30 e 90 dias



(Fonte: autor do estudo)

Os lotes ensaiados 24 horas após o aquecimento diferem no quantitativo de CPs uma vez que os mesmos não passaram por nenhum processo de reidratação, servindo de balizamento para o estudo, desta forma sendo necessário um número menor de CPs para a obtenção de dados.

4.2 PROCESSO DE AQUECIMENTO

O equipamento utilizado para o aquecimento foi um forno mufla, marca Sanchis, modelo E, onde foram ensaiadas as temperaturas do estudo: 300°C, 550°C e 800°C. Tais temperaturas foram escolhidas por representarem estados de mudança significativa na matriz cimentícia, conforme apresentado ao item 3.2.1, deste estudo.

O aquecimento se deu ao concreto após ter atingido a idade de 30 dias. Esta idade foi definida com base no preconizado pela NBR ABNT 6118/14, onde após 28 dias o concreto já alcançou sua maturidade no parâmetro resistência à compressão, sendo o ganho de resistência posterior pouco significativo, comparado àquele que já foi adquirido.

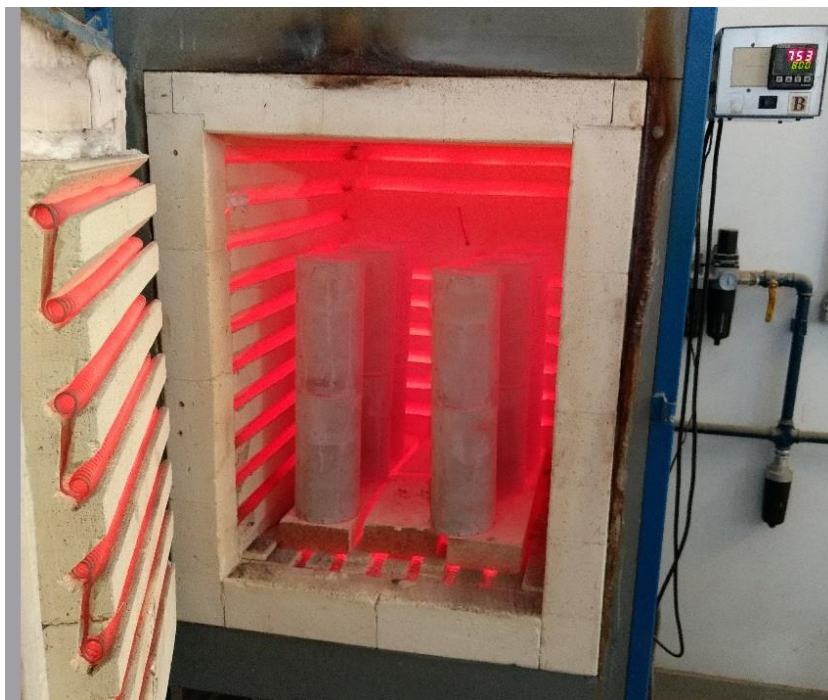
Os CPs foram submetidos a uma taxa de aquecimento linear de 10°C/min. Embora este seja um procedimento divergente daquele sugerido para ensaios desta natureza, nos quais se incentiva seguir as taxas de aquecimento das curvas padronizadas temperatura/tempo dos gases, como por exemplo, a curva ISO 834 (SILVA, 2001), foi adotada aquela taxa de aquecimento em função de limitações do equipamento utilizado no estudo aliado ao fato dos trabalhos que serviram de base comparativa (CASTILLO & DURANI, 1990 apud ALMEIDA, 2017; POON et al., 2001, apud ALMEIDA, 2017; ANNEREL & TAERWE, 2008, apud ALMEIDA, 2017; LI et al., 2014; SANTOS, 2012), foram também executados a taxas lineares de aquecimento a partir das orientações da norma RILEM 129-MHT, (2004), a qual postula que esta forma de aquecimento é mais adequada aos estudos com foco nas propriedades do material concreto em si, estando as curvas temperatura/tempo dos gases mais consoante ao ensaio de estrutura construídas com concreto (ALMEIDA, 2017).

A taxa de aquecimento foi mantida até que fosse alcançada a temperatura do ensaio, posteriormente este patamar era mantido por 60 minutos. Este período foi escolhido em função da condutividade térmica do concreto (0,8 W/mK) de forma que toda massa de CPs atingisse um equilíbrio térmico com o forno e sofresse a deterioração causada pelo gradiente térmico em todo o volume do CP, resultando em 90 minutos para o ensaio a 300°C, 115 minutos para o ensaio de 550°C e 140 minutos para o ensaio de 800°C. A escolha também se deu para comparação de resultados com os trabalhos utilizados como fontes bibliográficas (ANDRADE, et al., 2003; ARAUJO, et al., 2007; CARVALHO, 2001; LIN, et al., 2009; XIAO & KÖNIG, 2004). Cada conjunto aquecido foi composto de doze CPs⁴ para os quais se buscou alcançar

⁴ Com exceção do conjunto destinado ao ensaio de compressão após 24 horas, o qual consistia de sete CPs, haja vista que este conjunto não seria exposto ao processo de reidratação em câmara úmida.

uma equidistância simétrica de distribuição no interior do forno, permitindo assim uma oferta padronizada de energia a toda a superfície do concreto (figura 20).

Figura 19 - Distribuição dos CPs no interior do forno



(Fonte: autor do estudo)

4.3 PROCESSO DE RESFRIAMENTO

Transcorrido o tempo de cada ensaio, o conjunto de CPs foi dividido em dois grupos, os quais foram submetidos a processos de resfriamento distintos. O primeiro grupo foi resfriado com água imediatamente após ser retirado do forno, enquanto apresentam uma temperatura mais próxima possível àquela que estava submetido durante o processo de aquecimento, buscando assim proporcionar um choque térmico característico daquele ofertado ao material quando um incêndio é combatido com água. O segundo grupo foi resfriado naturalmente ao ar durante o tempo necessário para que os mesmos equalizem sua temperatura com a temperatura ambiente sem intervenções que acelerassem o processo, situação equivalente de um elemento sinistrado, já na fase final do incêndio, onde não existe mais material com potencial ignífero de propagar chamas e não se faz necessário o uso de água para o combate.

O processo de resfriamento com água seguiu uma sequência de passos: os CPs eram retirados do forno e pesados para verificação de perda de massa após o aquecimento (figura 21), em seguida se dava o resfriamento utilizando um acessório confeccionado no próprio LEME, o qual consistia numa câmara calibrada para aspersão de água a temperatura ambiente (média de

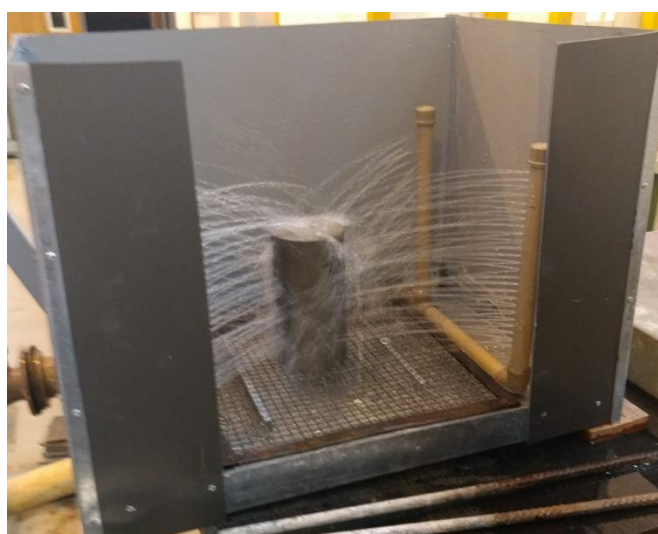
22,5°C entre os ensaios) a uma vazão de 60 litros de água por minuto, onde os CPs eram imersos por um período de 10 segundos (10 litros), período de tempo suficiente para proporcionar um choque térmico ao mesmo tempo que não saturaria os CPs de forma a causar ruídos nos resultados da reidratação (figura 22). Finalizado esse tempo de 10 segundos, os CPs eram retirados da câmara e deixados em repouso sobre um anteparo metálico, de forma a não absorver umidade de piso, até que sua temperatura entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente (figura 23).

Figura 20 – Pesagem após o aquecimento



(Fonte: autor do estudo)

Figura 21 - Equipamento para resfriamento com água



(Fonte: autor do estudo)

Figura 22 - CPs resfriados com água aguardando equalização com temperatura ambiente



(Fonte: autor do estudo)

O processo de resfriamento ao ar consistiu em conservar os CPs no interior do forno após o aquecimento e desligamento do equipamento, mantendo-se a porta do mesmo com uma abertura de 50%, para que houvesse uma mudança não abrupta, porém gradual do meio, proporcionando uma dissipação da temperatura e posterior equilíbrio térmico com o ambiente externo. Neste mesmo processo estavam contidos os CPs com os quais foram realizados os ensaios de absorção de água.

Foi ofertado aos CPs um período de repouso de 24 horas na busca do equilíbrio térmico dos mesmos, após este tempo se deu seguimento a próxima etapa do estudo.

4.4 PROCESSO DE REIDRATAÇÃO

O processo de reidratação teve início 24 horas após o aquecimento. Os grupos provenientes de ambos os processos de resfriamento foram novamente divididos em dois subgrupos. O primeiro subgrupo foi encaminhado para câmara úmida com umidade de 100%, onde permaneceu pelos períodos delimitados para a reidratação (30 e 90 dias). Para o segundo subgrupo foi buscado uma reidratação apenas com a umidade presente no ar, sendo deixado em repouso no subsolo do próprio laboratório, onde as condições de temperatura e umidade se apresentam mais constantes pelos mesmos períodos citados anteriormente. Estes CPs foram acomodados em

prateleiras, sem contato com o piso, visando minimizar a oferta e absorção de umidade por outro veículo que não fosse apenas o ar.

4.5 PROCESSO DE VERIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES MICRO ESTRUTURAIS

Para avaliar os danos micro estruturais sofridos pelo elemento, foi realizado um levantamento da evolução no índice de vazios dos CPs ao longo da elevação das temperaturas no ambiente no qual estavam imersos. Tal levantamento se deu por meio de ensaios de absorção de água, resistência a compressão e velocidade de pulso ultrassônico (VPU).

Os ensaios de absorção de água seguiram o postulado pela NBR ABNT 9778/2009 utilizando como parâmetro base a absorção inicial de um grupo composto de seis CPs dos dois lotes ensaiados em 24 horas (três unidades de cada lote) e para verificação da evolução da porosidade foi recolhido um CP aquecido a cada temperatura de todos os ensaios.

Os ensaios para avaliar a variação da resistência apresentada pelos concretos foram realizados teste de resistência à compressão com uso de uma prensa hidráulica de ensaios mecânicos (figura 23).

Figura 23 - Ensaio de compressão mecânica



(Fonte: autor do estudo)

Para os ensaios de VPU foram verificadas as velocidades do pulso em todos os CPs que seriam aquecidos, antes e após o aquecimento. Tal procedimento foi adotado para todos os lotes (figura 24).

Figura 24 - Ensaio de VPU



(Fonte: autor do estudo)

4.6 PROCESSO DE VERIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES MACRO ESTRUTURAIS

Para avaliação dos danos macro estruturais apresentados, foi realizado um levantamento visual dos CPs através de um mapeamento na evolução da propagação de fissuras nos próprios CPs ao longo da elevação das temperaturas no ambiente em que estavam imersos no decurso dos diversos ensaios.

Embora subjetivo, também foi observada a degradação apresentada pelos CPs dentro do mesmo lote (figura 25).

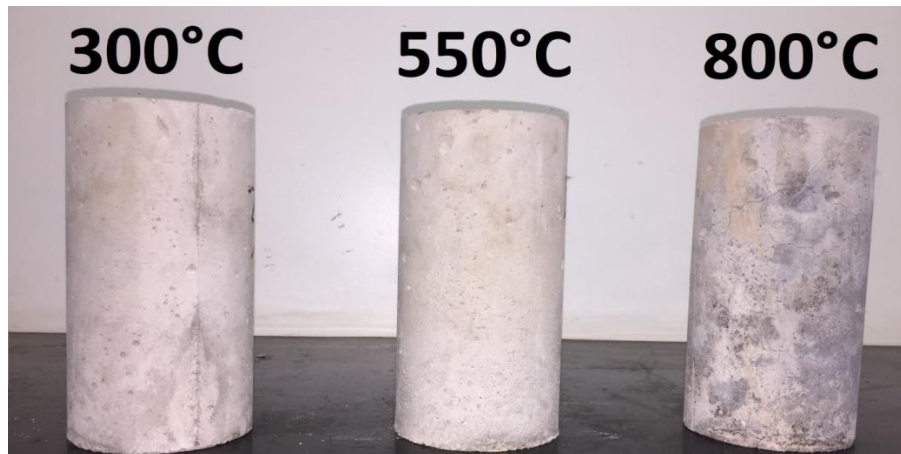
Figura 25 - Exemplos da degradação sofrida por alguns CPs dentro no mesmo lote ensaiado



(Fonte: autor do estudo)

Por fim, uma análise das alterações na cor do concreto foi realizada comparando as cores finais apresentadas (figura 26), com aquelas previstas por CANOVAS (1988) e aquelas encontradas por WENDT (2006) e ALMEIDA (2017).

Figura 26 - Variação da cor após ensaios em diferentes temperaturas



(Fonte: autor do estudo)

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, VPU, análise das observações visuais de fissuração e alterações da cor apresentadas pelos CPs ao longo de todos os processos de aquecimento, resfriamento e reidratação aos quais foram submetidos.

Foram realizadas análises comparativas entre os resultados do estudo relacionáveis direta e indiretamente, além de comparativos com resultados de ensaios similares apresentados pela literatura, objetivando a ratificação dos dados obtidos.

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados ao Anexo A.

5.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Uma análise microestrutural dos efeitos dos processos aos quais os concretos foram submetidos foi realizada com base na variação da velocidade de pulso ultrassônico no início e no final dos ensaios, além da variação do índice de vazios avaliado por meio de ensaios de absorção de água. Os resultados obtidos foram comparados com o referencial bibliográfico com objetivo de endosso dos mesmos.

5.1.1 Velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

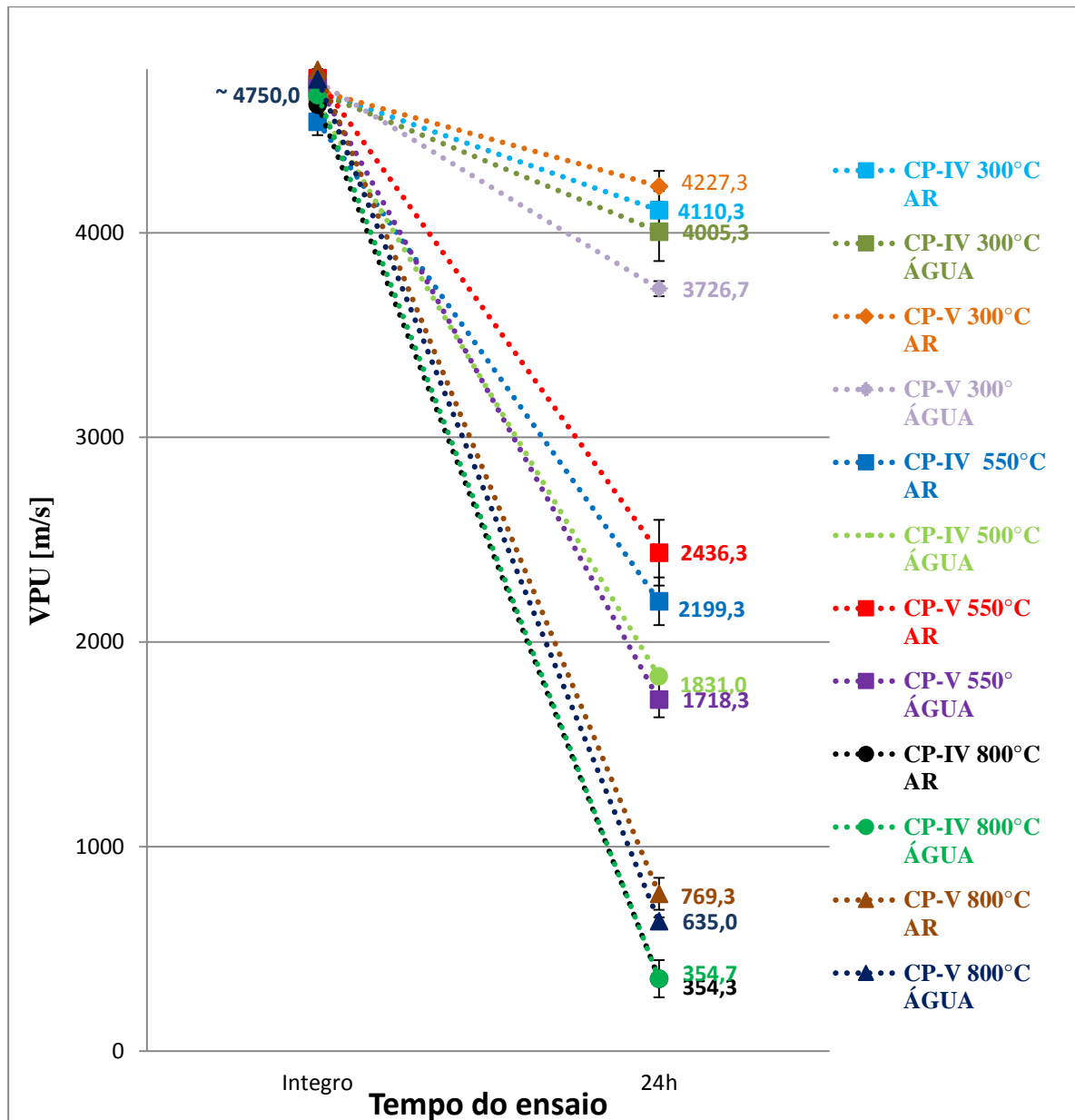
Os ensaios de verificação da VPU foram realizados antes de início dos ensaios, com os concretos ainda íntegros na idade de 28 dias, e após o fim de cada um dos ensaios, sendo 29 dias (para reidratação de 24 horas), 60 dias (para reidratação 30 dias) e 120 dias (para reidratação de 90 dias).

Foi verificado que o aumento da temperatura dos ensaios foi acompanhada de uma redução sistêmica progressiva na VPU para todos os concretos e processos de resfriamento, caracterizando um aumento nas descontinuidades internas dos CPs. Também foi verificado através das velocidades residuais, o fato do modo de resfriamento não ter sido suficiente para saturar os concretos, uma vez que as VPUs resultantes do resfriamento ao ar são superiores as resfriadas com água para todas as amostras (figura 27).

O processo de resfriamento empregado impactou diretamente na propagação de descontinuidades nos concretos, sendo o concreto no qual foi utilizado CP-IV mais prejudicado ao longo do ensaio com resfriamento lento para todas as temperaturas, com VPU média 2,6% inferior ao CP-V ARI até 550°C e 8,38% inferior a 800°C. Contrariamente, o concreto

utilizando CP-V teve um pior comportamento frente o resfriamento com água até a temperatura de 550°C, a partir da qual apresentou uma VPU 5,78% superior ao CP-IV (quadro 09).

Figura 27 - Variação da VPU de acordo com o processo de resfriamento e temperatura



(Fonte: autor do estudo)

Quadro 9 - VPU residual ao longo dos ensaios

Ensaio	Lote			
	CP-IV sem cura		CP-V sem cura	
	Resfriado ao ar	Resfriado com água	Resfriado ao ar	Resfriado com água
300°C	12,4%	14,5%	10,0%	21,4%
550°C	51,6%	60,4%	48,8%	63,6%
800°C	92,3%	92,4%	84,0%	86,6%

(Fonte: autor do estudo)

Por meio de uma análise da variância (ANOVA) dos dados coletados foi buscado levantar a veracidade da influência no processo de resfriamento com a redução da VPU, se tomando como significativo aquele valor-p menor que 5%, sendo constatado a influência significativa deste processo na deterioração dos concretos, o qual acarretou na redução da VPU constatada (quadros 10 a 13).

Quadro 10 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento ao ar ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-IV

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	3	13,9	4,6	0,006		
300°C	3	12,3	4,1	0,009		
550°C	3	6,6	2,2	0,013		
800°C	3	1,1	0,4	0,008		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	34,1	3	11,4	1257,4	4,9E-11	4,1
Dentro dos grupos	0,07	8	0,01			
Total	34,2	11				

(Fonte: autor do estudo)

Quadro 11 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento ao ar ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-V ARI

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	3	14,3	4,8	0,003		
300°C	3	12,7	4,2	0,006		
550°C	3	7,3	2,4	0,026		
800°C	3	2,3	0,8	0,006		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	29,6	3	9,9	981,7	1,3E-10	4,1
Dentro dos grupos	0,08	8	0,01			
Total	29,6	11				

(Fonte: autor do estudo)

Quadro 12 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com água ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-IV

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	3	14,0	4,7	0,001		
300°C	3	12,0	4,0	0,020		
550°C	3	5,5	1,8	0,0002		
800°C	3	1,1	0,4	9,3E-06		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	35,4	3	11,8	2187,5	5,4E-12	4,07
Dentro dos grupos	0,04	8	0,01			
Total	35,5	11				

(Fonte: autor do estudo)

Quadro 13 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com água ao longo das temperaturas na variação da VPU do concreto confeccionado com CP-V ARI

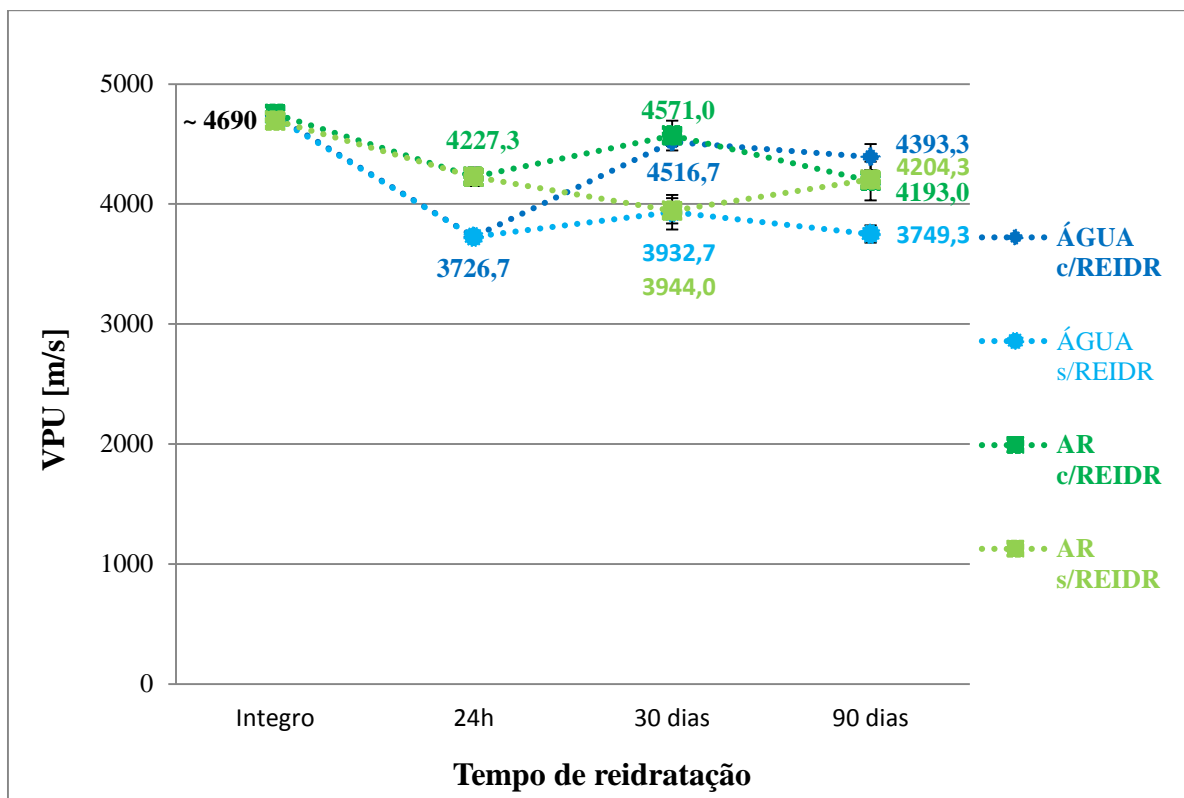
Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	3	14,2	4,7	0,0001		
300°C	3	11,2	3,7	0,0013		
550°C	3	5,2	1,7	0,0076		
800°C	3	1,9	0,6	0,0004		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	31,3	3	10,4	4423,3	3,2E-13	4,07
Dentro dos grupos	0,02	8	0,002			
Total	31,3	11				

(Fonte: autor do estudo)

Uma análise das alterações na variação da VPU ao longo dos processos de reidratação demonstra uma melhora nas condições dos concretos quanto à fissuração nos primeiros 30 dias de reidratação para todas as temperaturas ensaiadas e processos de reidratação, sendo para este último verificado uma maior recuperação naqueles CPs reidratados na câmara úmida frente os reidratados ao ar, conforme figuras 28 a 30.

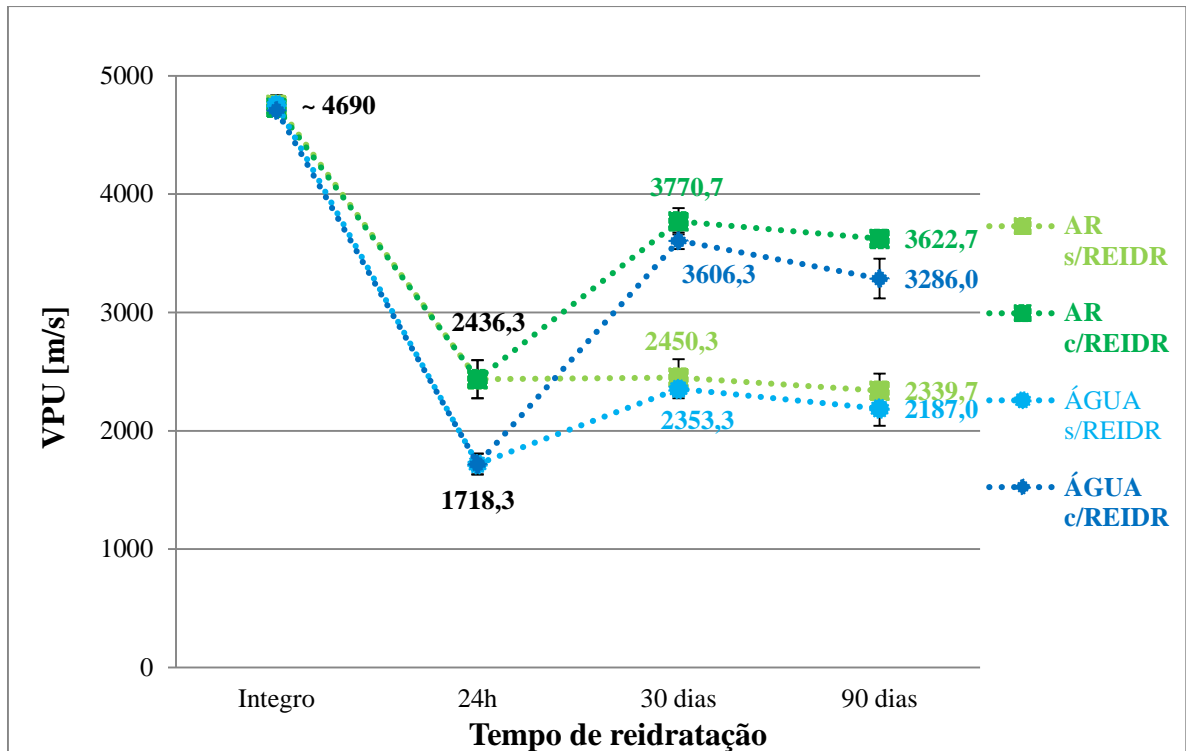
O aumento da VPU também confirma a maior presença de água no interior dos CPs reidratados em câmara úmida frente aqueles reidratados apenas com a umidade do ar.

Figura 28 - Variação da VPU para o aquecimento a 300°C ao longo do processo de reidratação



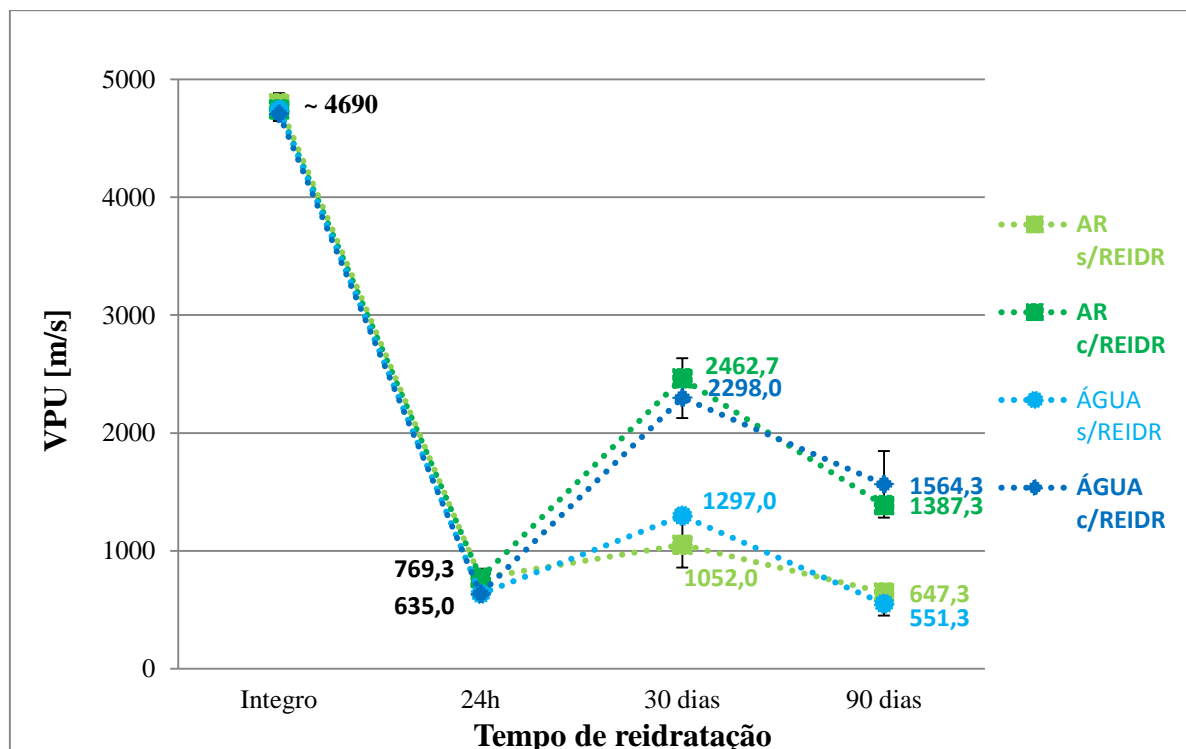
(Fonte: autor do estudo)

Figura 29 - Variação da VPU para o aquecimento a 550°C ao longo do processo de reidratação



(Fonte: autor do estudo)

Figura 30 - Variação da VPU para o aquecimento a 800°C ao longo do processo de reidratação



(Fonte: autor do estudo)

É verificado aos 90 dias de reidratação um decréscimo na VPU para todos os concretos e processos de reidratação. Tal comportamento pode ser causado por um aumento da fissuração interna dos CPs promovida pela hidratação de compostos resultantes do aquecimento, tais como CaO e MgO, os quais apresentam uma grande potencial expansivo quando hidratados acabando por causar e/ou propagar fissuras. Tal situação é constatada ao ser feito um comparativo entre a redução na VPU nos CPs reidratados na câmara úmida com aqueles reidratados ao ar (quadro 14). Aqueles concretos onde foi ofertada mais umidade apresentaram uma maior redução na VPU, visto que a maior presença de água propiciou que mais material expansivo reagisse resultando num maior comprometimento à matriz cimentícia. Tal fenômeno é descrito de forma mais aprofundada ao item 5.3.3.

Quadro 14 - Percentuais médios da VPU original apresentadas pelos concretos ao longo dos processos de reidratação

Ensaio	Resfriados AR			Resfriados ÁGUA		
	24 horas	30 dias	90 dias	24 horas	30 dias	90 dias
300°C sem reidratação	90,0%	84,0%	89,6%	89,0%	96,2%	88,3%
300°C com reidratação	78,9%	83,3%	79,4%	78,8%	95,4%	92,8%
550°C sem reidratação	51,2%	51,5%	49,2%	51,5%	79,7%	76,6%
550°C com reidratação	36,1%	49,5%	46,0%	36,5%	76,6%	69,8%
800°C sem reidratação	16,0%	21,9%	13,5%	16,2%	51,9%	29,2%
800°C com reidratação	13,4%	27,4%	11,6%	13,5%	48,8%	33,2%

(Fonte: autor do estudo)

5.1.2 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água para estimativa da evolução do índice de vazios apresentado pelos concretos foi executado com base no preconizado NBR ABNT 9778 (2009). A tabela com a evolução dos dados levantados ao longo do estudo pode ser verificada ao Anexo A.

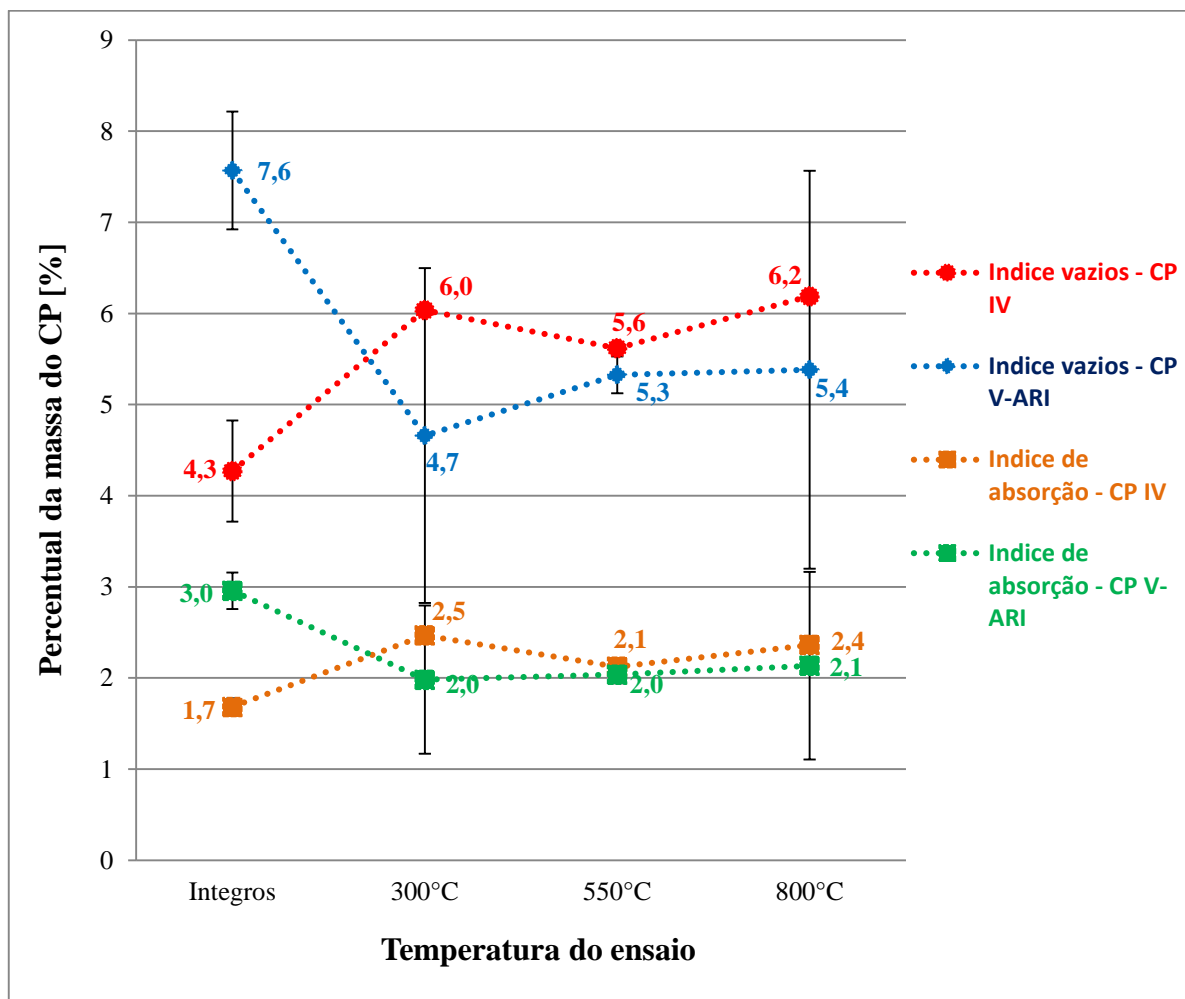
Embora uma mesma sequência de procedimentos tenha sido adotada para execução dos ensaios, uma dispersão foi verificada nos dados, conforme quadro 15. Porém, mesmo frente este espectro amplo entre máximos e mínimos, se verifica uma correspondência entre os índices avaliados, uma vez que os mesmos apresentam uma variação simétrica ao longo dos processos, como pode ser verificado a figura 30.

Quadro 15 - Resultados da variação do índice de absorção e índice de vazios

Absorção por imersão [%]					
Origem	Integros		300°C	550°C	800°C
	CP-IV	CP-V ARI			
Lote 24h CP-IV	1,8	---	2,5	2,1	2,4
	1,6	---			
	1,7	---			
Lote 24h CP-V ARI	---	3,2	1,2	2,2	3,1
Lote 30 dias	---	2,9	2,0	2,0	2,1
Lote 90 dias	---	2,8	2,8	2,0	1,1
Índice de vazios [%]					
Lote 24h CP-IV	4,4	---	6,0	5,6	6,2
	3,7	---			
	4,8	---			
Lote 24h CP-V ARI	---	8,3	2,9	5,6	7,5
Lote 30 dias	---	7,0	4,5	5,2	5,5
Lote 90 dias	---	7,4	6,6	5,3	3,2

(Fonte: autor do estudo)

Figura 31 - Alteração da absorção de água X índice de vazios ao longo dos processos



(Fonte: autor do estudo)

Verifica-se um aumento no índice de vazios acompanhado de um aumento no volume de água absorvida pelo concreto que utilizou CP-IV ao longo da elevação da temperatura. Embora o valor apresente uma variação para menos conforme o decorrer dos ensaios, foi tomado de linear para crescente, tendo em vista o curto espaço de valores apresentado e também pelo fato deste ensaio ter sido realizado apenas com um CP deste traço para cada temperatura. O fato do índice de vazios acompanhar a variação da absorção é apresentado como parâmetro que corrobora o dado anterior.

O ensaio com concreto constituído de CP-V ARI foi realizado com três CPs. Com objetivo de evitar tendências resultante de alguma particularidade desconhecida em algum lote, se optou para o ensaio com concreto confeccionado com CP-V ARI, utilizar um CP de cada lote, totalizando três peças, como detalhado ao item 4.5. O modo como se deu este ensaio é apresentado como uma das causas fator da variação massiva apresentada ao quadro 15.

Para este concreto foi verificada uma redução inicial no índice de vazios, acompanhada de uma redução na absorção de água. Esta anomalia nos resultados pode ter origem numa falha durante o estudo que resultou no ensaio do grupo de referência, aqui chamado de “íntegro”, não ter sido realizado no mesmo transcurso de tempo dos ensaios das demais temperaturas. Este lote foi ensaiado aos 120 dias de idade, enquanto os demais lotes foram ensaiados 24 horas após os aquecimentos.

Excetuando-se este valor inicial, é verificado para estes concretos e, dentro dos limites para aquele utilizando CP-IV, um aumento no índice de vazios conforme foram elevadas as temperaturas de exposição, confirmando uma deterioração interna aos CPs, embasando o aumento de absorção de água verificado e indo ao encontro daqueles resultados encontrados no ensaio de VPU.

5.1.3 Resistência mecânica

A resistência mecânica dos concretos foi avaliada através de ensaios de resistência à compressão realizado com o uso de uma prensa universal de 2000 kN, modelo Shimadzu UH-I, centrado em relação ao eixo de carregamento.

A figura 32 apresenta um lote finalizado após os processos de aquecimento e reidratação, pronto para o ensaio de compressão para verificação da resistência residual. Os resultados dos ensaios de compressão são apresentados ao Anexo A.

Figura 32 - Lote finalizado para ensaio de compressão



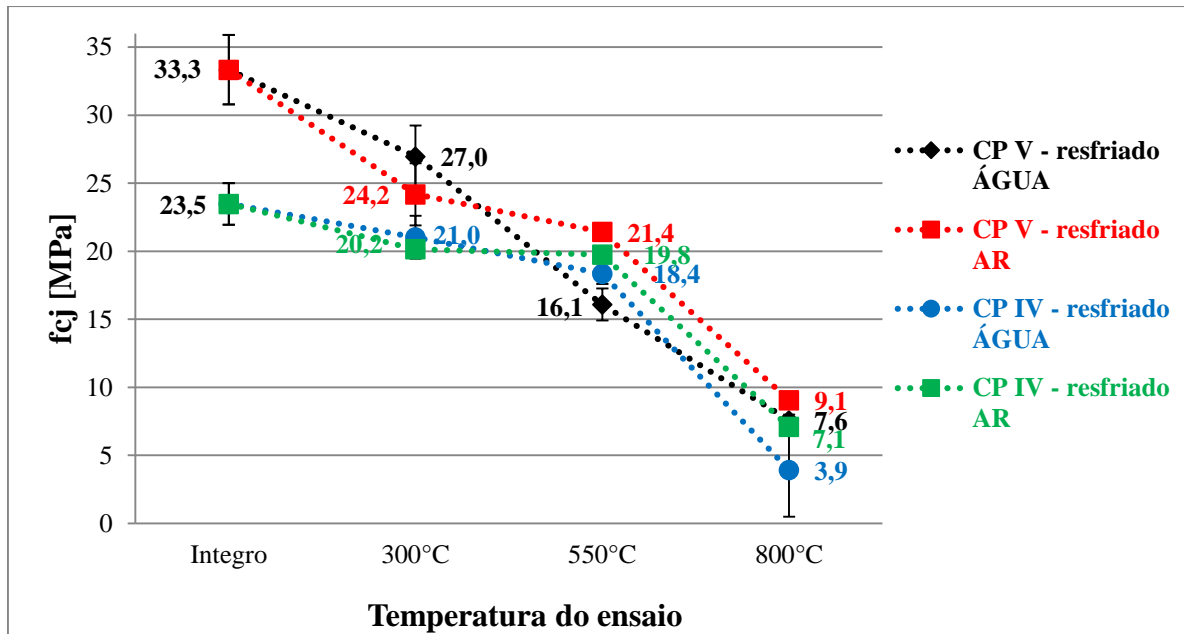
(Fonte: autor do estudo)

5.1.3.1 Efeito da Temperatura

Foi verificada uma gradativa diminuição massiva e na resistência à compressão dos CPs conforme o aumento das temperaturas ensaiadas, independente das outras condições de contorno a que foram submetidos. Estas perdas têm como principal fator a evaporação da água presente no concreto, reduzindo assim sua massa e decompondo os componentes responsáveis pela resistência da pasta de cimento, resultando na minoração da resistência residual após exposição às elevadas temperaturas (COSTA & SILVA, 2002).

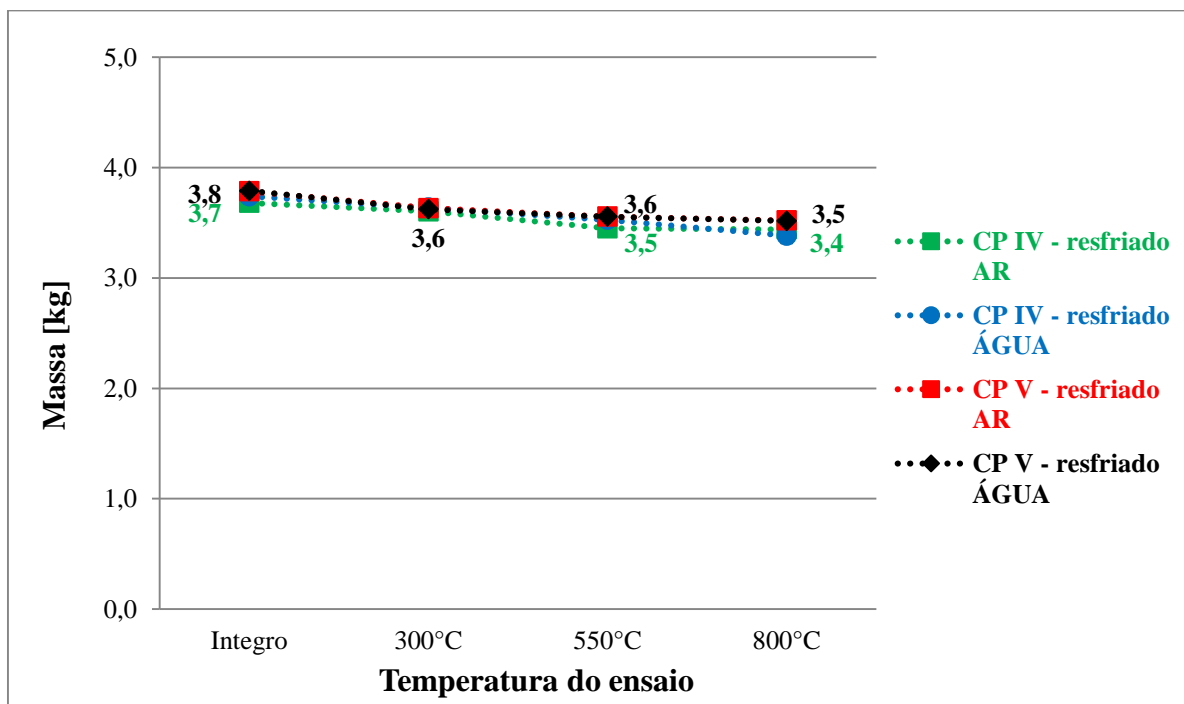
SOUZA & MORENO Jr., (2003) corroboram esta informação, apontando em seu trabalho que a matriz cimentícia, após sofrer um processo de calcinação, apresenta perdas massivas, com destaque para os intervalos de temperatura entre 150 à 500°C, resultante da desidratação dos aluminatos hidratados e da Ca(OH)_2 (portlandita), porém voltam a ganhar massa após reidratados, levando a crer que pode estar ocorrendo uma reidratação dos compostos que perderam sua água estrutural durante a calcinação. As figuras 33 e 34 apresentam a variação de resistência e massa verificadas ao longo dos ensaios.

Figura 33 - Variação da resistência a compressão ao longo da elevação das temperaturas



(Fonte: autor do estudo)

Figura 34 - Variação da massa ao longo da elevação das temperaturas



(Fonte: autor do estudo)

Como é possível constatar a perda massiva apresentou uma linearidade ao longo dos processos, não sendo afetada de forma significativa pelo processo de resfriamento ou aglomerante utilizado, com uma redução média na ordem de 3% aos 300°C, 6% aos 550°C e 8% aos 800°C.

Uma análise por meio da variância (ANOVA) dos dados coletados revelou que o fator temperatura é significativo na perda de massa verificada no estudo, conforme apresentado aos quadros 16 a 19.

Quadro 16 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com ar ao longo das temperaturas na variação da massa do concreto confeccionado com CP-IV

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	9	33,1	3,7	0,003		
300°C	3	10,8	3,6	0,003		
550°C	3	10,4	3,5	0,004		
800°C	3	10,3	3,4	0,001		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,2	3	0,067	25,3	6,5E-06	3,3
Dentro dos grupos	0,04	14	0,003			
Total	0,24	17				

(Fonte: autor do estudo)

Quadro 17 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com água ao longo das temperaturas na variação da massa do concreto confeccionado com CP-IV

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	9	33,7	3,7	0,005		
300°C	3	10,9	3,6	0,001		
550°C	3	10,6	3,5	0,002		
800°C	3	10,2	3,4	0,004		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,32	3	0,11	28,5	3,2E-06	3,3
Dentro dos grupos	0,05	14	0,004			
Total	0,37	17				

(Fonte: autor do estudo)

Quadro 18 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com ar ao longo das temperaturas na variação da massa do concreto confeccionado com CP-V ARI

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	9	34,1	3,8	0,001		
300°C	9	32,7	3,6	0,002		
550°C	9	32,0	3,6	0,001		
800°C	9	31,7	3,5	0,001		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,37	3	0,12	83,0	3,5E-15	2,9
Dentro dos grupos	0,05	32	0,002			
Total	0,42	35				

(Fonte: autor do estudo)

Quadro 19 - ANOVA para significância variável tipo do resfriamento com água ao longo das temperaturas na variação da massa do concreto confeccionado com CP-V ARI

Resumo						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Integro	9	34,1	3,8	0,001		
300°C	9	32,6	3,6	0,001		
550°C	9	32,0	3,6	0,001		
800°C	9	31,7	3,5	0,001		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,39	3	0,13	111,69	5,0E-17	2,9
Dentro dos grupos	0,04	32	0,001			
Total	0,43	35				

(Fonte: autor do estudo)

Por outro lado, a diminuição da resistência à compressão se apresentou influenciada simultaneamente pelo processo de resfriamento e pelo aglomerante empregado, sendo os CPs confeccionados com CP-V ARI mais deteriorados sob os efeitos do gradiente de temperaturas crescente e os CPs resfriados com água aqueles que, em média, sofreram maiores perdas ao longo com as maiores temperaturas. O quadro 20 apresenta os valores percentuais de redução da resistência de acordo com as condições de contorno.

Quadro 20 - Percentual de redução na resistência à compressão sob diferentes processos

Ensaio	Lote			
	CP-IV sem cura		CP-V sem cura	
	Resfriado ao ar	Resfriado com água	Resfriado ao ar	Resfriado com água
300°C	14,2%	10,5%	27,5%	19,1%
550°C	15,9%	21,8%	35,8%	51,8%
800°C	69,8%	83,3%	72,8%	77,3%

(Fonte: autor do estudo)

Ao utilizar a ANOVA para verificação de significância dos dados, se tomando como significativo aquele valor-p menor que 5%, é constatado significância na redução da resistência com a elevação da temperatura associada à variação do aglomerante e também do processo de resfriamento. O resultado desta análise pode ser verificado resumidamente ao quadro 21.

Quadro 21 - Resumo tratamento ANOVA para significância variável temperatura na redução da resistência

Fator	F crítico	F	valor-P
Aglomerante	2,9	4,5	0,01
Método de resfriamento	3,3	48,1	6,23E-08

(Fonte: autor do estudo)

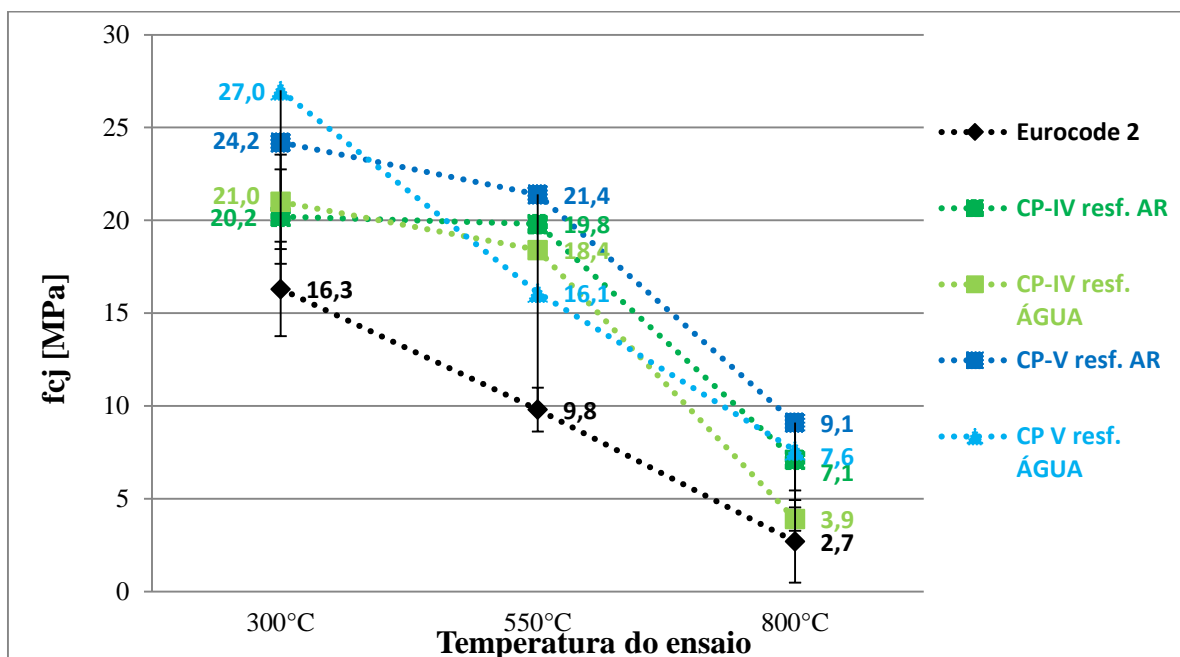
O quadro 22 e a figura apresenta um comparativo entre a resistência prevista com base no Eurocode 2 (2001), e NBR ABNT 15200 (2014), calculados por meio da equação 02, e aqueles encontrados no estudo, estes últimos com valores acima daqueles estimados com base nas normas. A literatura (SOUZA & MORENO Jr., 2003) cita este resultado como um efeito da metodologia dos ensaios das normas, onde o concreto é aquecido sob carregamento e ensaiado ainda a quente, características que reduziram sua resistência frente à metodologia empregada neste estudo, apresentada nos itens 4.1 e 4.2.

Quadro 22 - Resistências estimadas versus resistências encontradas (valores em MPa)

Ensaio	Resistência estimada	Valor encontrado no estudo			
		CP-IV sem cura		CP-V sem cura	
	Eurocode 2 (NBR 15200)	Resfriado ao ar	Resfriado com água	Resfriado ao ar	Resfriado com água
300°C	16,3	20,2	21,0	24,2	27,0
550°C	9,8	19,8	18,4	21,4	16,1
800°C	2,7	7,1	3,9	9,1	7,6

(Fonte: autor do estudo)

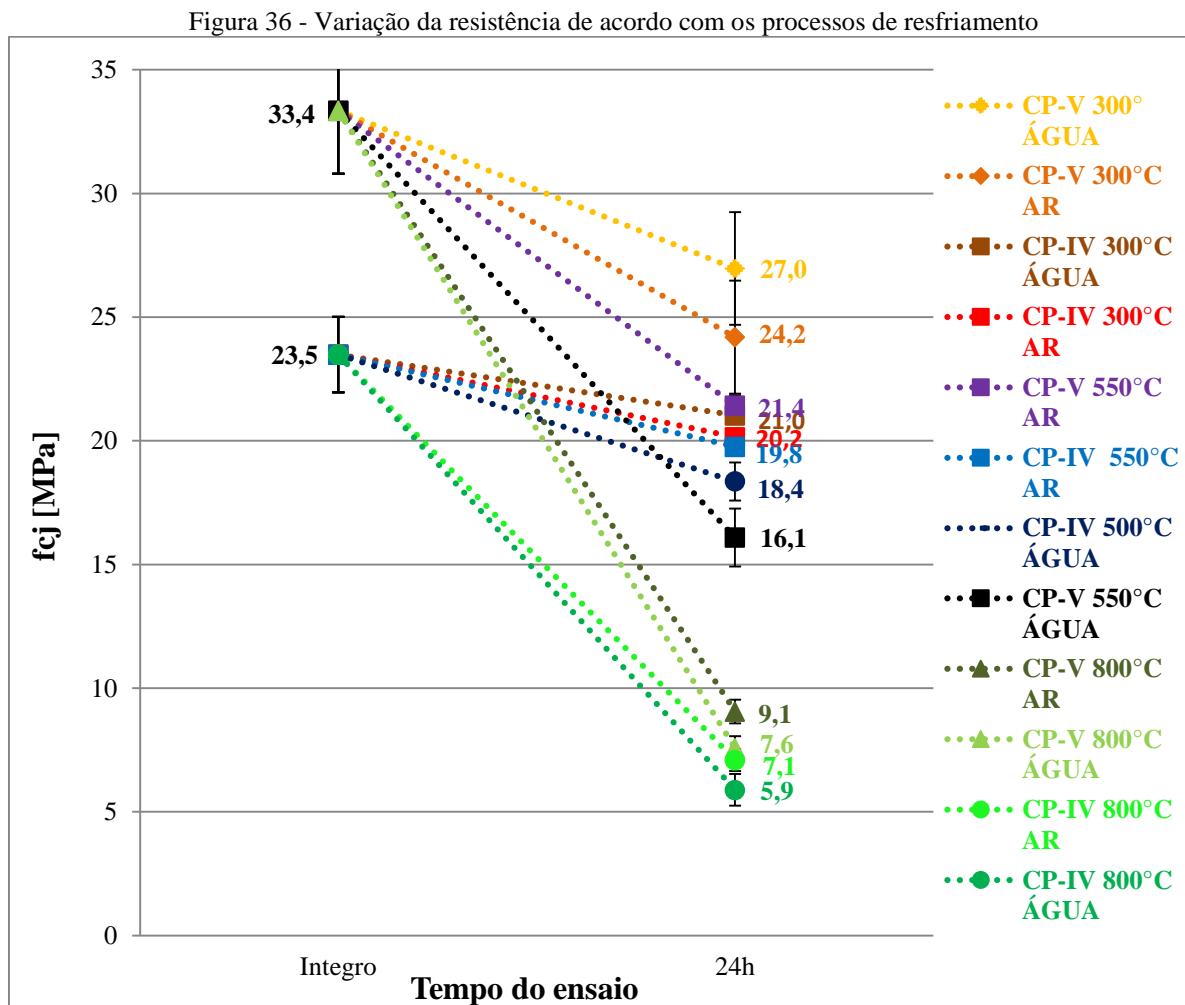
Figura 35 – Comparativo da resistência estimada em norma versus resistências encontradas nos ensaios



(Fonte: autor do estudo)

5.1.3.2 Efeito do Resfriamento

O processo de resfriamento empregado se mostrou significativo na variação da resistência à compressão ao fim dos ensaios, como citado ao item anterior. A figura 36 apresenta graficamente aqueles resultados expressos ao quadro 14.



(Fonte: autor do estudo)

São verificadas perdas mais acentuadas naqueles CPs resfriados com uso de água frente os resfriados ao ar. A literatura consultada (LIN, et al., 2009) descreve perdas e, eventualmente, ganhos de resistência na pasta de cimento após o resfriamento abrupto com água. A redução na resistência é relacionada à propagação de fissuras na estrutura, resultante da variação volumétrica dos compostos expansivos presentes, com destaque para o CaO, o qual reidrata-se com a água utilizada no resfriamento, podendo chegar a um aumento de 44% no seu volume, propagando a fissuração existente. A reidratação na matriz cimentícia promovida durante o resfriamento, por outro lado, é responsável por um aumento na resistência, visto que a maior

porosidade adquirida pelo aumento das temperaturas de exposição propicia o trânsito desta água mais profundamente no interior do CP, porém estes ganhos não são proporcionais às perdas promovidas pela expansão dos componentes, anteriormente citada, resultando numa variação menor da resistência.

Como o concreto resfriado ao ar tem uma oferta menor de umidade, a propagação de fissuras por expansão volumétrica é menos significativa, resultando em uma resistência maior resistência residual.

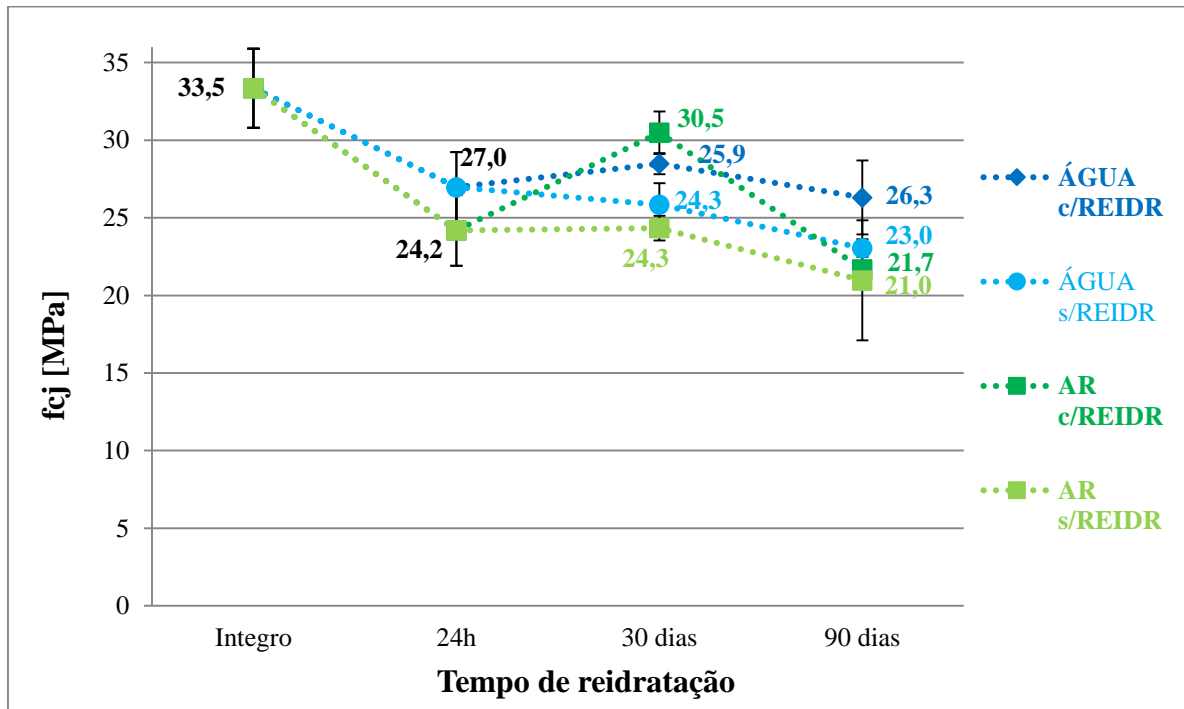
Esta conceituação também pode ser apropriada para explicar os resultados onde, embora o concreto confeccionado com cimento CP-IV apresente uma resistência inicial em torno de 29,5% menor do que aqueles onde foi utilizado CP-V ARI, o concreto confeccionado com CP-IV apresentou menores perdas de resistência após o aquecimento em todas as temperaturas. Uma vez que os CPs onde foi utilizado CP-IV se apresentavam originalmente mais frágeis, a fissuração descrita anteriormente foi menos danosa do que naquele concreto utilizando CP-V ARI, o qual teve sua matriz mais afetada no processo, resultando em perdas mais acentuadas ao fim dos processos de resfriamento.

5.1.3.3 Efeitos da Reidratação

Nesta fase do estudo foram ensaiados apenas os CPs confeccionados com cimento CP-V ARI, visto ser um aglomerante com menor percentual de impurezas e também ser o mesmo utilizado na literatura de base (COSTA & SILVA, 2002; ALMEIDA, 2017; CARVALHO, 2001; METHA & MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 1997; ANDRADE, et al., 2003; HERTZ, 1999; NOUMOWE, et al., 1996; WENDT, 2006; XIAO & KÖNIG, 2004).

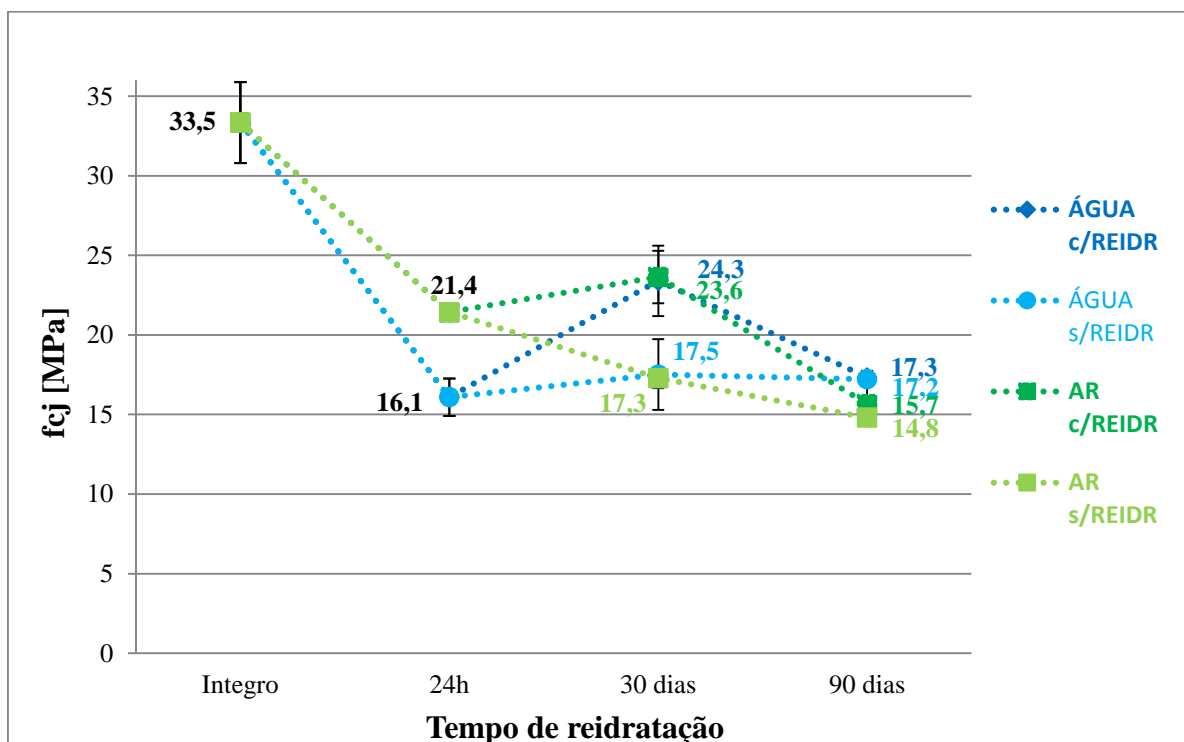
O processo de reidratação, com metodologia descrita ao item 4.4, apresenta resultados expostos nas figuras 37 a 39. Conforme pode ser verificado, o concreto apresenta ganhos de resistência nos primeiros 30 dias de reidratação, para todas as amostras, independente das temperaturas ou processos de resfriamento ao qual foram submetidos, indo ao encontro da suposição inicial. Porém há uma redução gradativa na resistência a partir desta idade para todas as amostras até os 90 dias de reidratação. Este último comportamento se mostrou parte ou integralmente alternativo àquele citado na bibliografia de referência (ARAUJO , et al., 2007; ALMEIDA, 2017; CANOVAS, 1988; SOUZA & MORENO Jr., 2003; LIN, et al., 2009).

Figura 37 - Variação da resistência para o aquecimento a 300°C ao longo do processo de reidratação



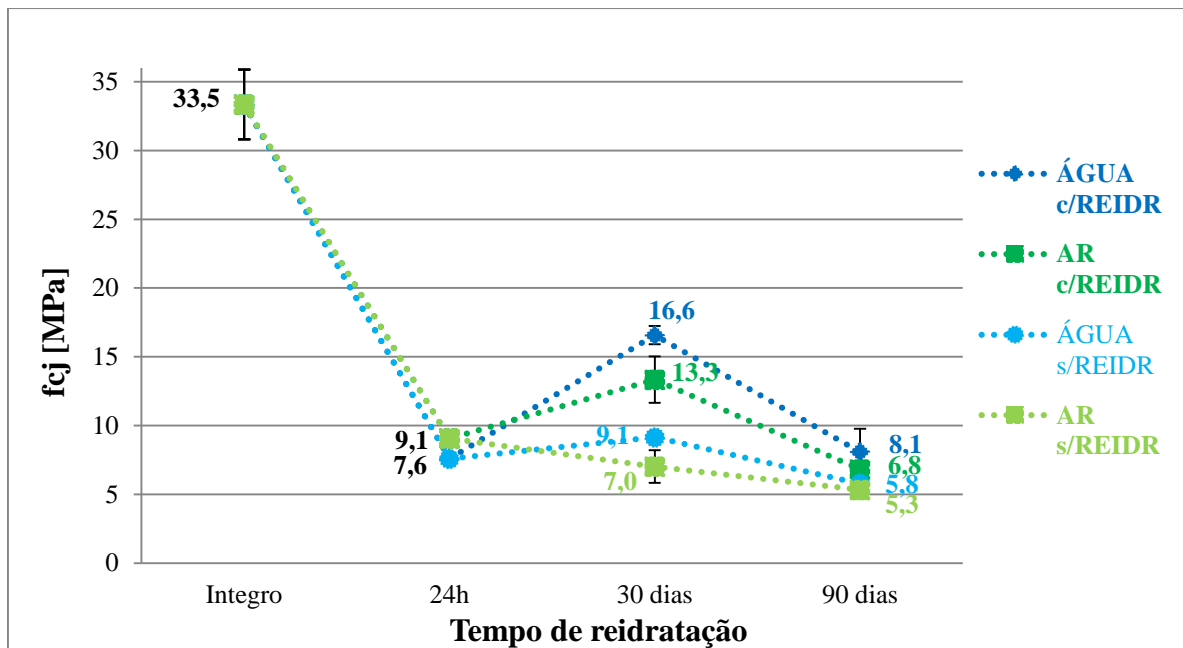
(Fonte: autor do estudo)

Figura 38 - Variação da resistência para o aquecimento a 550°C ao longo do processo de reidratação



(Fonte: autor do estudo)

Figura 39 - Variação da resistência para o aquecimento a 800°C ao longo do processo de reidratação



(Fonte: autor do estudo)

O quadro 23 apresenta os valores percentuais médios da resistência residual apresentada pelos CPs de acordo com os grupos ensaiados ao longo do processo de reidratação, observando que o grupo de 24 horas não foi reidratado na câmara úmida, sendo apresentado aqui com objetivo de comparação da resistência dos concretos ao início do processo de reidratação pós o aquecimento.

Quadro 23 - Resistências percentuais médias apresentadas pelos concretos ao longo do estudo

Ensaio	Resfriados AR			Resfriados ÁGUA		
	24 horas	30 dias	90 dias	24 horas	30 dias	90 dias
300°C sem reidratação	72,6%	73,0%	62,9%	72,6%	91,4%	65,0%
300°C com reidratação	80,9%	77,5%	69,1%	80,9%	85,4%	78,9%
550°C sem reidratação	64,2%	51,8%	44,4%	64,2%	70,9%	46,9%
550°C com reidratação	48,3%	52,5%	51,6%	48,3%	70,2%	52,0%
800°C sem reidratação	27,2%	21,0%	16,0%	27,2%	40,0%	20,4%
800°C com reidratação	22,7%	27,4%	17,3%	22,7%	49,7%	24,3%

(Fonte: autor do estudo)

Os resultados para o primeiro ciclo do processo de reidratação deste trabalho e para as temperaturas mais baixas ensaiadas, apontam uma concordância para a maior parte do referencial bibliográfico apresentado ao item 3.4.1, divergindo, em parte, quando se trata das demais condições de contorno.

Nas pesquisas sobre o tema (ARAUJO, et al. 2007; ALMEIDA, 2017; SOUZA & MORENO Jr, 2003), bem como os resultados deste estudo o ganho de resistência apresentado pelos concretos aos primeiros dias de reidratação pode ser explicado pelo fato constatado do aquecimento aumentar o índice de vazios nos CPs favorecendo o transporte da água até o interior dos mesmos, possibilitando a recomposição dos produtos de hidratação responsáveis pela resistência do concreto (C-S-H, C-H e etringita), decompostos quando da desidratação causada pela calcinação a elevadas temperaturas em todo o volume do CP. Uma vez que a formação da etringita pode levar até 18 horas após o contato com a água, a percolação lenta da água por todo interior do sólido, resulta em um tempo maior para que todo o material disponível para hidratação seja ativado (LEA, 1971).

Pode ser verificado nas figuras 36 a 38, que as maiores recuperações de resistência residual se deu nos CPs reidratados, independente da temperatura de aquecimento, seguido daqueles grupos que foram resfriados com água sem reidratação, finalizando com os grupos onde foi ofertado apenas a umidade do ambiente, tanto para resfriamento quanto para reidratação.

Porém, juntamente com os produtos de hidratação, a oferta de água ativa compostos expansivos altamente reativo no interior do concreto, tais como CaO e MgO, que podem aumentar o seu volume em até 100% e 140%, respectivamente. Além disso, estes compostos reagem com a água por um período maior de tempo, até 24 horas (LEA, 1971). No início do processo de reidratação a água ofertada é disputada por todos os compostos com os quais tem afinidade, porém como os produtos de hidratação completam primeiro seu ciclo de formação, mais água torna-se disponível para os compostos expansivos reagirem, desta forma propagando a fissuração do concreto por um período de tempo maior do que aquele onde esta ocorrendo o ganho de resistência. Tal fato foi verificado na redução da VPU, e poderia explicar a redução da resistência residual após o ciclo de 90 dias de reidratação.

Um fato que corrobora esta teoria está no estudo de ARAUJO et al. (2007), o qual apresentou ganhos de resistência contínuos, independente das variáveis de contorno, no processo de reidratação utilizando solução de água com cal. Uma vez que o concreto se encontrava numa solução saturada a reatividade do CaO com água foi significativamente reduzida, retardando a propagação de fissuras e mantendo o saldo positivo do ganho de resistência propiciado pelos produtos de hidratação.

Outra possível resposta para a redução da resistência após 30 dias está na formação de etringita secundária, ou tardia, a qual se forma no concreto já endurecido como resultante do ataque por sulfatos oriundos da matriz cimentícia ou da presença de FeS_2 no agregado, os quais reagem com CA(OH)_2 formando gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), este por sua vez reage com os aluminatos

presentes formando compostos como a etringita e a gipsita, implicando num mecanismo expansivo com consequente fomento da fissuração em elementos de concreto. O processo de formação da etringita secundária, neste cenário, se caracteriza pela recristalização da fase etringita na matriz cimentícia de concretos já endurecidos, durante a exposição à alta umidade (SACHS, 2012), como é o caso do processo de reidratação empregado, uma vez que os CPs ficaram armazenados em câmara úmida com 100% de umidade.

Alguns autores descrevem o calor de hidratação superior a 65°C como um fator fundamental para o surgimento da etringita secundária, porém GOMIDES (2007), em um estudo sobre a fissuração do concreto por ataque de sulfetos, realizado junto a hidroelétrica de FURNAS, ressalta que o calor de hidratação é uma variável menor no processo de formação, sendo os elevados índices de umidade ofertados ao concreto uma característica preponderante do meio para a formação da etringita secundária.

5.2 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

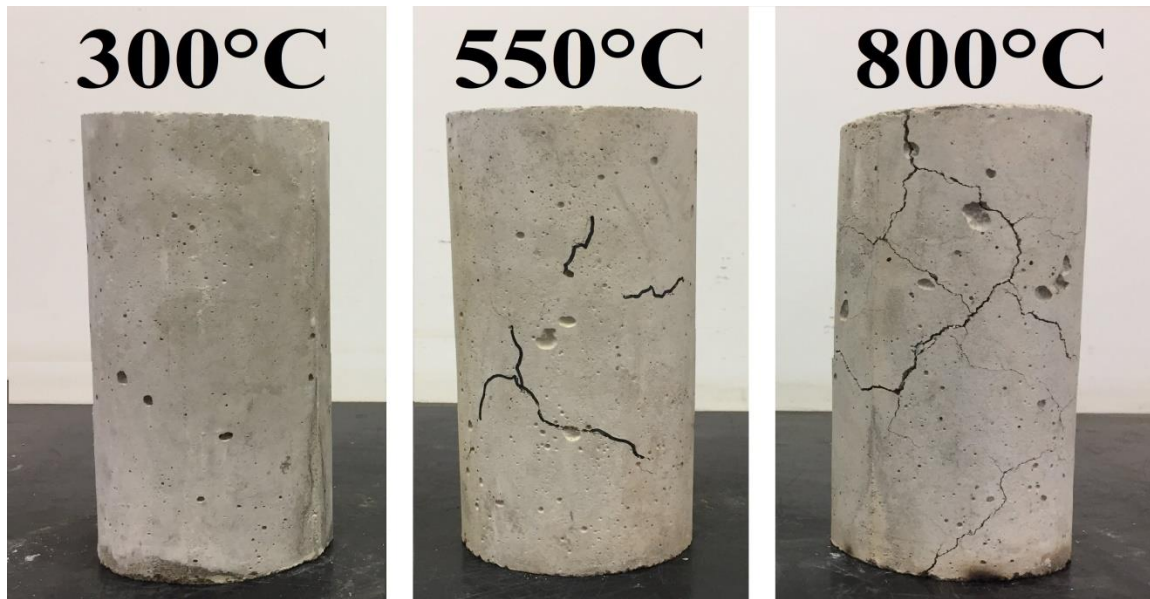
Uma análise macroestrutural das alterações apresentadas pelo concreto ao longo dos processos teve por base a verificação da evolução da deterioração e propagação de fissuras apresentada pelos CPs, bem como a verificação das suas alterações de cor, comparativamente com os resultados apresentados pelo referencial bibliográfico.

5.2.1 Propagação de Fissuras

Avaliando visualmente os concretos é de fácil identificação o aumento na propagação de fissuras conforme foram aumentadas as temperaturas de aquecimento (figuras 40 e 41, onde a fissuração dos CPs ensaiados a 550°C foi realçada para melhor visualização). Também se verifica um aparente aumento no comprometimento sofrido pelo concreto confeccionado com CP-V ARI na faixa de temperatura de 550°C frente aqueles em que foi utilizado CP-IV.

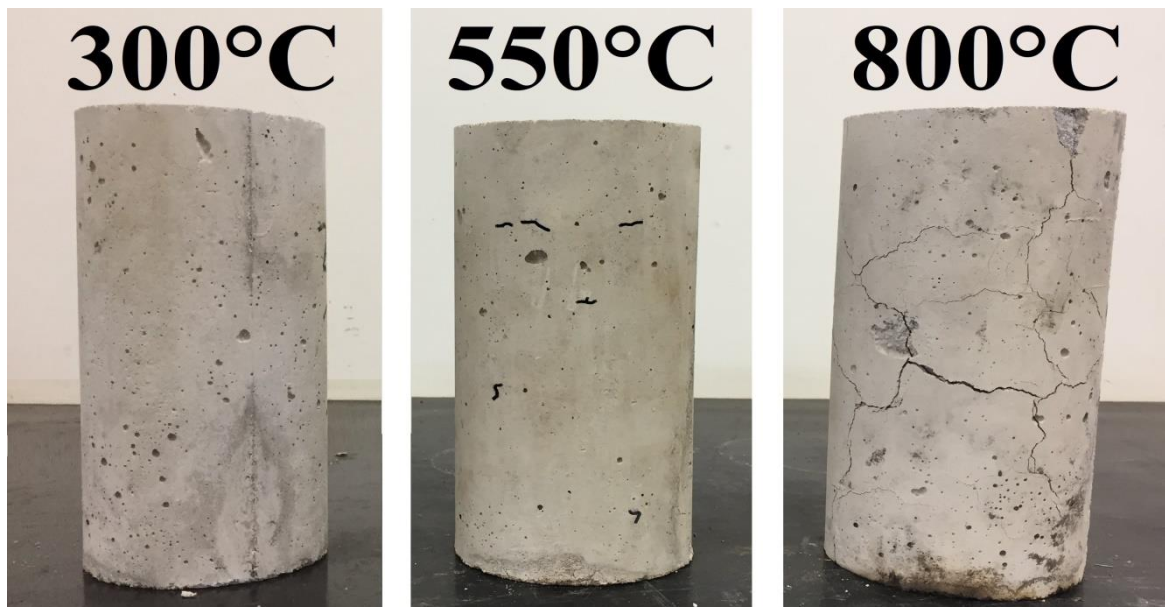
Essa análise não verificou uma relação direta com os processos de resfriamento, uma vez que todos os CPs dentro da mesma faixa de temperatura ensaiada apresentaram uma fissuração semelhante independente desta variável (figura 42).

Figura 40 - Evolução da fissuração ao longo das temperaturas ensaiadas CP-V ARI



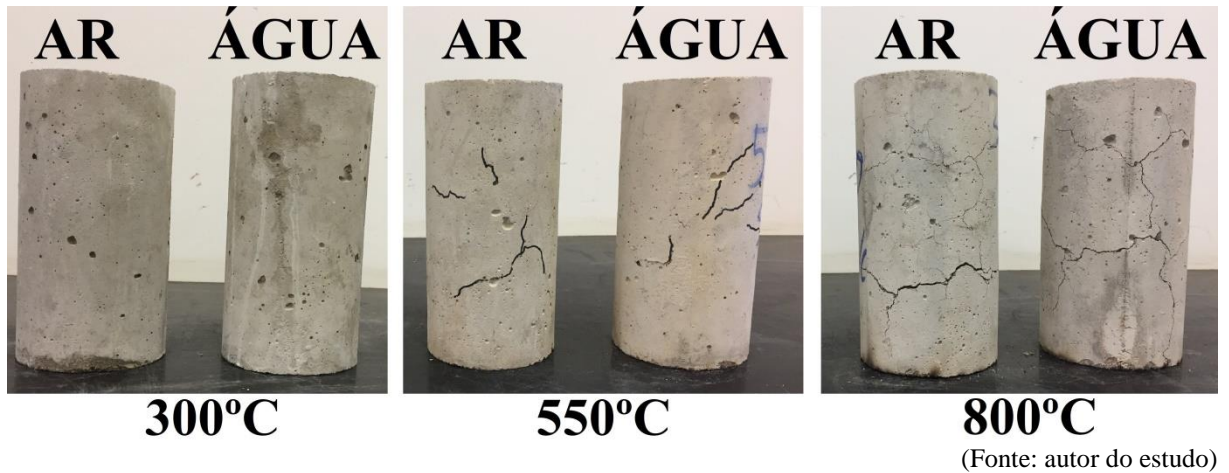
(Fonte: autor do estudo)

Figura 41 - Evolução da fissuração ao longo das temperaturas ensaiadas CP-IV



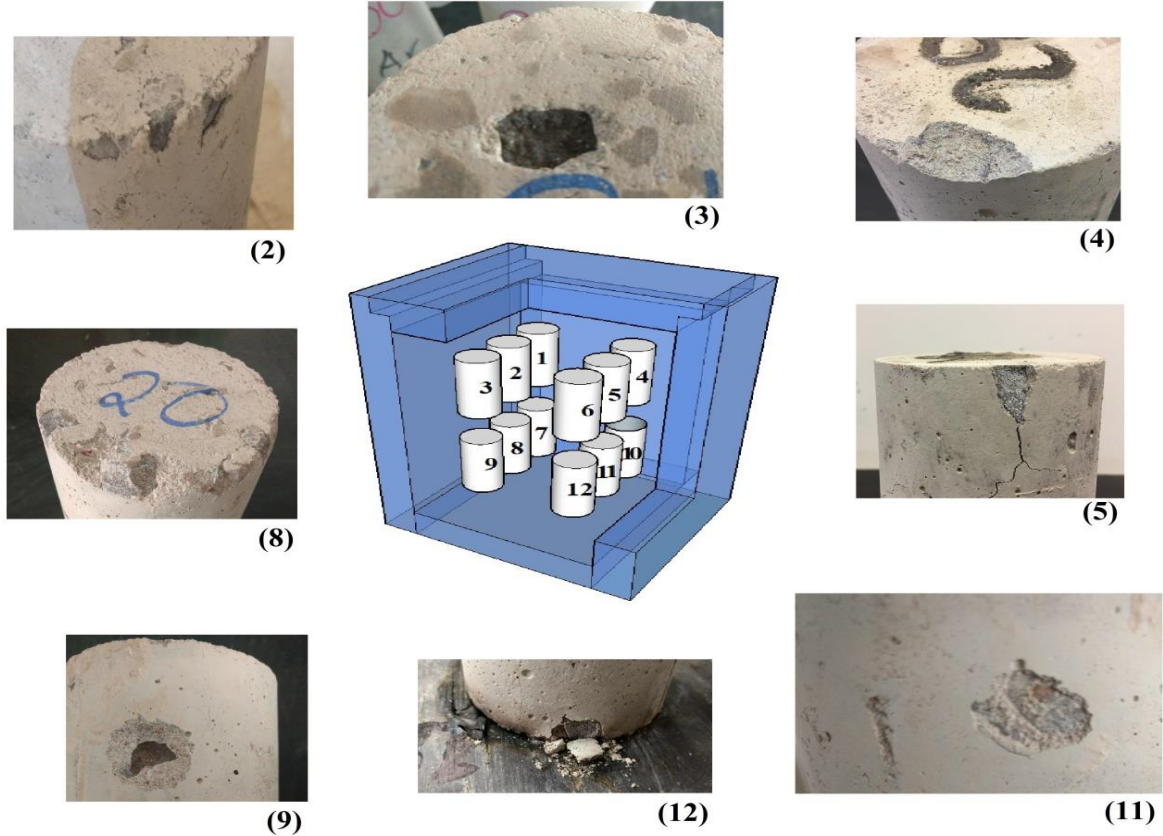
(Fonte: autor do estudo)

Figura 42 - Evolução da fissuração ao longo das temperaturas ensaiadas de acordo com modo de resfriamento.



Foi verificada a deterioração dentro do mesmo lote ensaiado a fim de avaliar uma possível localização de maior ou menor potencial degenerativo no interior da mufla. Com base neste parâmetro foram verificados danos aos CPs em todas as posições, concluindo-se que a distribuição dos CPs ofertou a mesma intensidade de energia a todos, não sendo criada nenhuma região com maior potencial de degradação (figura 43).

Figura 43 - Variação da degradação em função da posição dentro da mufla



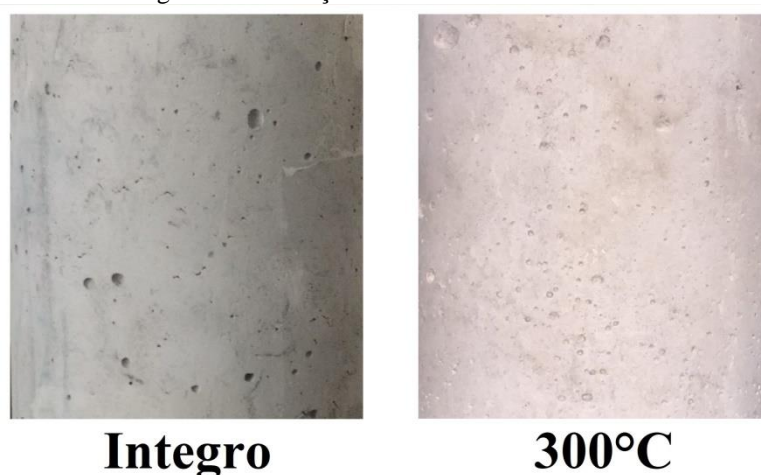
5.2.2 Variação de cor

A análise visual da variação da cor dos concretos teve como objetivo verificar uma padronização entre a coloração apresentada ao final de cada ensaio e a temperatura a qual os CPs foram imersos. Para tanto, os concretos foram analisados 24 horas após os aquecimentos, sendo verificados apenas CPs oriundos dos grupos resfriados ao ar, tendo em vista que naqueles onde foi utilizada água, foi descaracterizado o propósito desta verificação.

A análise dos concretos foi realizada na mesma sala, na mesma hora do dia, sob iluminação artificial de lâmpadas fluorescentes, com o objetivo de minimizar a influência de outras variáveis que pudessem alterar resultados, visto que seria realizada apenas uma avaliação visual da mudança da cor após os processos, sem a utilização de nenhum equipamento para caracterizar as tonalidades finais.

Cabe ainda salientar que a variedade de concretos que podem ser produzidas levando-se em conta as características dos insumos, tais como composição dos agregados miúdos e graúdos, bem como a própria configuração de um incêndio, tal como proximidade as chamas ou produção de fuligem, torna subjetiva uma análise baseada na cor apresentada pelo concreto após exposição a altas temperaturas, sendo esta apenas um recurso complementar ao processo. Nos ensaios de 300°C foi verificado um clareamento na tonalidade do concreto, resultando num cinza mais claro que os dos CPs não aquecidos (figura 44), resultado condizente ao descrito por CANOVAS (1988) e também encontrado por WENDT (2006).

Figura 44 - Variação de cor do concreto a 300°C

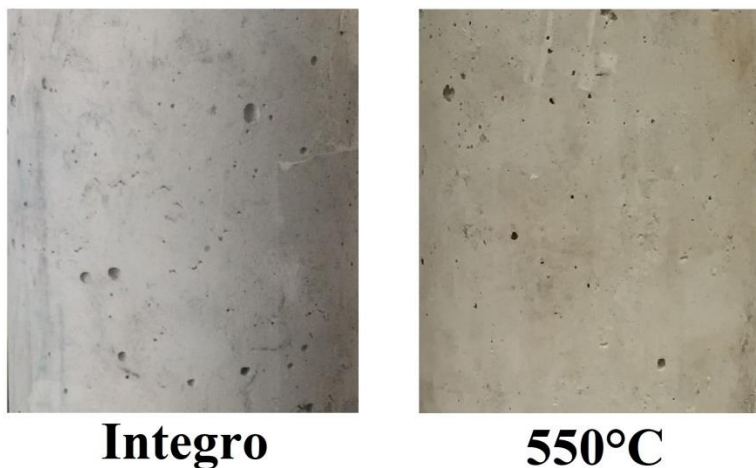


(Fonte: autor do estudo)

Nos ensaios de 550°C foi verificada uma leve coloração amarelada nos CPs (figura 45). Este resultado vai de encontro ao previsto por CANOVAS (1988), que descreve uma coloração de tons avermelhados para esta faixa de temperatura, porém é condizente com os resultados encontrados por WENDT (2006) e ALMEIDA (2017). Tal resultado seria oriundo do agregado

miúdo utilizado no traço dos concretos, o qual apresentava pouco material ferroso em sua constituição aliado ao fato daquela coloração vermelha ser verificada para uma faixa bem estreita de temperaturas entre 480°C e 500°C, a partir da qual evoluiria aos tons amarelados encontrados no estudo (WENDT, 2006).

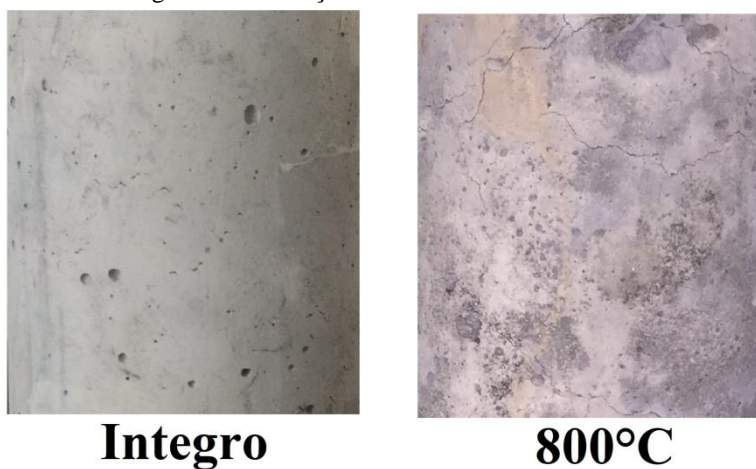
Figura 45 - Variação da cor do concreto a 550°C



(Fonte: autor do estudo)

Nos ensaios de 800°C foi verificado o retorno da tonalidade cinza claro, com poucos pontos amarelados, somado a presença de um manchamento generalizado na cor cinza escuro por toda a extensão do CP. Esta apresentação não encontrou referências no referencial bibliográfico, tendo como explicação as condições de contorno dos estudos, uma vez que todos os trabalhos referenciados utilizaram concretos que foram expostos a água em alguma etapa dos ensaios, enquanto neste estudo foi avaliado apenas concretos resfriados ao ar (figura 46).

Figura 46 - Variação da cor do concreto a 800°C



(Fonte: autor do estudo)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas neste trabalho são válidas para as condições de ensaio e parâmetros adotados para a realização desta pesquisa. Como exemplo, cita-se o fato de que o tempo de exposição dos corpos de prova às altas temperaturas, de 60 minutos após o forno atingir a temperatura de ensaio, não garante a uniformidade da temperatura de ensaio em toda a massa de concreto, como mostram os resultados de ALMEIDA (2017), o que poderá ter contribuído para que os resultados experimentais apresentem algumas divergências com a literatura, especificamente, menor redução da resistência com o aumento da temperatura.

A variável resistência à compressão ao fim das etapas de aquecimento dos concretos apresentou uma redução já para o primeiro patamar de temperatura de exposição ensaiado, 300°C, sendo respectivamente para o uso de CP-IV e CP-V ARI, uma variação a menor média de 14% e 27%, quando resfriados ao ar, bem como 10% e 19%, quando resfriados com água. Esta redução pode ser associada ao aumento da porosidade e início da desidratação e consequente decomposição de parte do C-S-H, conforme prevista por METHA & MONTEIRO (2014). No patamar de exposição a temperaturas de 550°C, verificou-se um decréscimo médio de resistência, respectivamente, para o uso de CP-IV e CP-V ARI, de 16% e 36% quando resfriado ao ar, e de 22% e 52% quando resfriados com água, resultado da perda do Ca(OH)_2 decomposto em CaO (METHA & MONTEIRO, 2014), aliado ao aumento da porosidade e fissuração, contribuiu para a redução da resistência citada. Por fim, ao ser alcançado o patamar de 800°C foi verificada a redução média, respectivamente, para o uso de CP-IV e CP-V ARI, de 70% e 73%, quando resfriado ao ar e de 75% e 77%, quando resfriado com água. Estes valores de perdas tão acentuados estão relacionados a decomposição de grande parte do C-S-H quando nesta temperatura, ocorrendo reações de vitrificação, as quais forneceram os compostos cimentícios pontenciais para reidratação como C-H e C-S-H após o resfriamento (VIEIRA & ISHIKAWA, 2000), fato confirmado pelas maiores recuperações serem verificadas nos concretos aquecidos nesta faixa de temperatura, com um máximo de 219% para aqueles resfriados com água e reidratados em câmara úmida. Embora esta taxa de recuperação sugira um ganho significativo de resistência, cabe salientar que este aumento tem um caráter mais virtual do que aplicável de maneira vantajosa, visto que o mesmo ocorreu num concreto muito fragilizado após exposição as temperaturas mais altas deste estudo. Neste sentido como a resistência residual foi muito baixa, mesmo com taxa de recuperação apresentada, não seria suficiente para recuperar este material, sendo necessário um reforço estrutural, senão a substituição do elemento.

As menores perdas verificadas junto às amostras confeccionadas com CP-IV não podem ser interpretadas literalmente como um melhor comportamento ao fogo deste aglomerante frente ao CP-V ARI. Os ensaios de VPU realizados junto aos CPs ainda íntegros demonstraram que naqueles onde foi utilizado CP-IV era verificado um maior índice de desconformidades. Neste sentido, como existe um valor finito para a deterioração que pode ser alcançada pelo concreto (ANDRADE, et al., 2003), aqueles que utilizaram CP-IV iniciaram os ensaios mais próximo deste limite, enquanto aqueles confeccionados com CP-V ARI apresentavam um menor índice de descontinuidades quando íntegros, dispondo de um espectro maior de perdas até alcançar aquele limite de deterioração citado por ANDRADE, et al (2003). Este fato pode ser verificado na figura 42, onde mesmo com maiores percentuais de perda, 98% dos concretos onde foi utilizado CP-V ARI chegaram ao fim do ensaio de aquecimento com uma resistência à compressão superior àqueles confeccionados com CP-IV.

Os resultados apresentados evidenciam uma variação da influência do modo de resfriamento na redução da resistência residual para ambos os concretos, uma vez que o emprego de água produziu menos danos na temperatura de 300°C, invertendo este comportamento aos 550°C, ao passo que foi relativamente indiferente aos 800°C. Estas informações revelam um dado de importante relevância, tendo em vista que o patamar de temperaturas em torno de 500°C é facilmente ofertado durante um incêndio pelos materiais combustíveis sólidos encontrados nas edificações (DINENNO, et al., 2002)

Por outro lado o uso da água se mostrou benéfico, visto que, conforme previsto por ARAUJO (2007), aqueles concretos apenas resfriados com água, sem nenhum processo de reidratação, apresentaram uma maior recuperação da resistência ao final dos 90 dias, sendo inclusive superior aos concretos resfriados ao ar mesmo após reidratação em câmara úmida, confirmando que a água utilizada no processo de resfriamento é, em parte, positiva para a recuperação da resistência residual após a exposição a altas temperaturas.

A eficácia da reidratação evidenciou uma variação na recuperação da resistência em função da temperatura máxima de exposição, do processo e do tempo de reidratação utilizado.

- A reidratação em câmara úmida onde foi ofertado 100% de umidade ao concreto resultou uma recuperação significativa frente ao processo utilizando apenas umidade do ar, fato relevante, visto que locais de baixa umidade relativa do ar a recuperação por este processo seria virtualmente nula, ao passo que locais muito úmidos se apresentariam vantajosos.

- O tempo de reidratação se mostrou benéfico apenas nos primeiros 30 dias, visto que neste período foram verificadas as maiores recuperações, sendo elas de 6% após 300°C, 45% após 550°C e 219% após 800°C. Após a recuperação parcial nos primeiros 30 dias a resistência reduziu entre 30 e 90 dias. Uma das causas prováveis para a variação na resistência ao longo da reidratação poderá ser atribuída à formação de etringita e portlandita através da reidratação do CaO proveniente da desidratação do concreto com as altas temperaturas: numa primeira fase os compostos formados fecham parcialmente poros e fissuras, mas na continuidade do processo de reidratação, posteriormente a formação desses compostos aumenta o dano no concreto, por serem processos expansivos (ALMEIDA, 2017).
- A reidratação em câmara úmida, onde foi ofertado 100% de umidade ao concreto, causou uma recuperação da resistência mais significativa comparativamente à reidratação utilizando apenas umidade do ar.
- A reidratação propiciou uma maior recuperação percentual média para a temperatura mais alta dos ensaios, 800°C, porém como o grau de dano apresentado pela estrutura foi muito elevado nesta temperatura, na prática a recuperação do concreto através da reidratação seria inviável. Para os outros ensaios foi verificada uma recuperação de 70,15% para 550°C e 85,43% para 300°C.

Dentro do âmbito deste trabalho, os resultados indicam que existe um maior potencial para a recuperação parcial da resistência do concreto convencional confeccionado com CP V-ARI quando exposto a altas temperaturas de até 550°C e, posteriormente, reidratado em ambiente com 100% de umidade. Porém essa eventual recuperação ocorre apenas nas idades iniciais e depois regride, apontando a necessidade de garantir que o concreto não continue reidratando após a recuperação inicial.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados levantados com este estudo e o pouco material disponível, revela a importância da realização de pesquisas voltadas ao tema degeneração das estruturas de concreto acometidas por incêndios, bem como à determinação de medidas efetivas para o restabelecimento das propriedades afetadas pela ação do aquecimento, devolvendo as estruturas condições que permitam atender seu propósito, dentro das condições de segurança exigidas.

Como sugestão de trabalhos que venham complementar este estudo, bem como as demais produções nesta área, proponho um estudo dirigido que venha averiguar o fenômeno de redução na resistência verificado para maiores período de reidratação, interpretado ao item 5.3.3, com objetivo de verificar as teorias expostas, bem como averiguar se a interrupção total da reidratação após aquele tempo de exposição seria suficiente para conter a deterioração verificada. Caso contrário, e a redução da resistência fosse continuada, confirmaria como sendo este o comportamento natural inevitável pós aquecimento em elevadas temperaturas e uma reidratação posterior não seria suficiente para atender aquilo ao que se propõe, visto que mesmo com a aparente recuperação inicial verificada, seria apenas um ganho virtual, pois já no curto prazo a resistência recuperada já estaria extinta.

Proponho também a pesquisa mais aprofundada sobre comportamento antagônico da água no resfriamento, estabelecendo os limites para os quais este elemento contribuiria ou prejudicaria a resistência residual da estrutura sinistrada, bem como a busca de métodos alternativos ao uso direto da água na extinção das chamas, porém que ofertem umidade a estrutura sinistrada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 2005. *ABNT NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos -Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa e massa específica*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2014. *ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ALMEIDA, J. M. A., 2017. *Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz*, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDRADE, C., ALONSO, C. & KHOURY, G. A., 2003. *Os efeitos do calor no concreto - Porosidade e microfissuras*. Udine: Centro Internacional de Ciências Mecânicas (CISM).

ARAUJO, L., VIECELI, D., LIMA, R. & SIL, L., 2007. *Estudo sobre a eficiência da reidratação induzida na recuperação parcial da resistência de concretos afetados pela exposição a altas temperaturas*. s.l., s.n.

BAUER, L. A. F., 2013. *Materiais de construção civil: Novos materiais para construção civil*. Rio de Janeiro: Editora LTC.

BONITESE, K. V., 2007. *Segurança contra incêndio em edifício habitacional de baixo custo estruturado em aço*, Belo Horizonte: Dissertação de mestrado, UFMG.

BUCHANAN, A. H. & ABU, A. K., 2017. *Projeto estrutural para segurança de incêndio*, 2ª edição. Wellington, Nova Zelândia: Editora Wiley.

CANOVAS, M. F., 1988. *Patologia e terapia do concreto armado*. São Paulo: Editora Pini.

CARVALHO, E. F. T. d., 2001. *Contribuição ao estudo de resistência residual do concreto submetido ao tratamento térmico padrão para situações de incêndio*, Dissertação - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Eng. Civil UFOP: Ouro Preto, 2001.

CHAGAS, A. P., 2006. *A história e a química do fogo*. São Paulo: Editora Átomo.

CORPO DE BOMBEIROS, d. E. d. S. P., 2004. *Conceitos básicos de segurança contra incêndio*. São Paulo: s.n.

COSTA, C. N. & SILVA, V. P., 2002. *Estruturas de concreto em situações de incêndio*. Brasília, Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural.

DHIR, R. K., DYER, T. D. & TELFORD, T., 1999. *Materiais do concreto moderno: Ligações, aditivos e adições*. Dundee, Escócia: Thomas Telford.

- DIAS, L. A. d. M., 1998. *Estruturas de aço - Conceitos, técnicas e linguagem*. São Paulo: Editora Zigurate.
- DINENNO, P. J. et al., 2002. *Livro de mão de engenharia de proteção contra incêndio*. Massachusetts: Sociedade de engenharia de proteção contra incêndio.
- DORFMAN, G., 2003. *História do concreto - Desde os primórdios até a primeira guerra*, Brasília: UNB.
- FERNANDES, J., BITTENCOURT, T. & HELENE, P., 2008. *Uma revisão da aplicação de concreto em estruturas marinhas*. Farmington Hills, Instituto de concreto americano, pp. 393-408.
- HELENE, P. & LEVY, S., 1996. Cura - Como, quando e por quê. *Téchne n° 20*.
- HELENE, P. & TERZIAN, P., 1992. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: Editora Pini.
- HERTZ, K. D., 1999. *Análises de estruturas de concreto expostas ao fogo*. s.l.:IBE-DTU.
- HOUAISS, A., 2009. *Dicionário Houaiss*. Rio de Janeiro: Editora Objetiva.
- ISAIA, G. C., ANDRADE, T. & HELENE, P., 2010. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. s.l.:Editora Ibracon.
- KAEFER, L. F., 1978. *A evolução do concreto armado*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- KARLSSON, B. & QUINTIERE, J. G., 1999. *Dinâmica do fogo enclausurado (Engenharia ambiental e de energia)*. Londres, Inglaterra: Editora CRC Press.
- LANDI, F. R., 1986. *Ação do incêndio sobre estruturas de concreto armado*, São Paulo: Boletim Técnico n° 01/86, PCC-EPUSP.
- LEA, F. M., 1971. *A Ciência do Cimento e Concreto*. 3ª Edição ed. s.l.:Chemical Publishing Co, Inc..
- LINDGARD, J. & HAMMER, T. A., 1998. Resistência ao fogo de concreto estrutural de agregado leve - Um levantamento literário com focus no Spalling. *Quarto Conferencia Internacional para Avanços na Tecnologia do Concreto*.
- LIN, Y., HSIAO, C., YANG, H. & LIN, Y., 2009. O efeito da cura no relacionamento velocidade-força para valiação não destrutiva da resistência do concreto dnificado pelo fogo. *Fire Safety Journal*, Issue 46.
- MARCO, F. F., REGINALDO, G. & JACOSKI, C., 2003. *Capreamento de neopreme, enxofre e pasta de cimento para corpos de prova cilíndricos de concreto*. Vitória, Ibracon.

- METHA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M., 2014. *Concreto - Estrutura, propriedades e materias*. São Paulo: Editora Pini.
- MORALES, G., CAMPOS, A. & FAGARELLO, A. M. P., 2011. *Semina: Ciências exatas e tecnológicas*, Londrina: s.n.
- MOREIRA, J. R. S., 2012. *Notas de aula - Processos de transferência de calor*, São Paulo: Politécnica USP.
- NASSIF, A. Y., 2000. Efeitos da taxa de resfriamento sobre as propriedades residuais do concreto aquecido. *Magazine of Concrete Research*, 52(4), pp. 287-295.
- NEVILLE, A. M., 1997. *Propriedades do concreto*. São Paulo: Editora Pini.
- NOUMOWE, A., CLASTRES, P., DEDICKI, G. & COSTAZ, J., 1996. *Efeitos do aquecimento transiente em concretos de alta resistencia*. s.l.:Nuclear Engenharia e Design.
- PHAN, L. T., CARINO, N. J., DUTHINH, D. & GARBOCZI, E., 1997. *Workshop internacional sobre performace de concreto de alto desempenho ao fogo*, s.l.: NIST.
- PURKISS, J. A., 2007. *Engenharia de segurança contra incêndios: design das estruturas*. Amsterdam: Editora Butterworth-Heinmann.
- RILEM, T. C., 2004. *RILEM TC 129-MHT: Métodos de teste para propriedades de concreto sob altas tempeturas*. s.l.:s.n.
- SACHS, A., 2012. Calor sob controle. *Téchne*, Issue 190.
- SEITO, A. I. et al., 2008. *A segurança contra incêndio no Brasil*. São Paulo: Projeto Editora.
- SILVA, V. P., 2001. *Estruturas de açõ em situação de incêndio*. São Paulo: Editora Zigurate .
- SOUZA, A. A. A. & MORENO Jr., A. L., 2003. *Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto*. In: *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*. São Paulo, s.n.
- VIEIRA, S. & ISHIKAWA, P., 2000. *Avaliação dos danos provocados por incêndio em estruturas de concreto: Estudo de caso*, São Paulo: s.n.
- WENDT, S. C., 2006. *Análise da mudança de cor em concretos submetidas a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica - Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- XIAO, J. & KÖNIG, G., 2004. Estudo em concreto a altas temperaturas na China. *Fire Safety Journal*, Issue 71, pp. 89-103.

8 ANEXO A

Tabela 1 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 01 (aglomerante: CP-IV; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 horas)

CP	Data concretagem	Temperatura de queima [°]	Modo de Resfriamento	Peso integro [kg]	Peso fissurado [kg]	Perda de massa [gr]	Altura CP [m]	Fc [MPa]	Carga ruptura [kN]	Idade CP ensaiado [dias]	Tempo pulso integro [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPU integro [m/s]	VPU fissurado [m/s]
1	17/10/2017	300	AR	3,77	3,67	-100	0,1994	19,92	156,47	36	42,4	49,4	4,703	4,036
2	17/10/2017	300	AR	3,69	3,58	-110	0,1922	20,54	161,34	36	40,1	45,6	4,793	4,215
3	17/10/2017	300	AR	3,65	3,56	-90	0,1930	20,00	157,09	36	42,1	47,3	4,584	4,080
4	17/10/2017	300	ÁGUA (23,6°)	3,81	3,68	-130	0,1986	19,89	156,23	36	42,4	51,4	4,684	3,864
5	17/10/2017	300	ÁGUA (23,6°)	3,72	3,61	-110	0,1949	22,82	179,24	36	41,5	48,7	4,696	4,002
6	17/10/2017	300	ÁGUA (23,6°)	3,74	3,62	-120	0,1963	20,38	160,08	36	42,0	47,3	4,674	4,150
7	17/10/2017	550	AR	3,62	3,42	-200	0,1927	19,19	150,73	37	42,1	84,4	4,577	2,283
8	17/10/2017	550	AR	3,61	3,41	-200	0,1912	19,88	156,15	37	41,7	85,0	4,585	2,249
9	17/10/2017	550	AR	3,72	3,52	-200	0,1952	20,21	158,74	37	43,7	94,5	4,467	2,066
10	17/10/2017	550	ÁGUA (22,5°)	3,63	3,48	-150	0,1925	18,03	141,62	37	42,5	105,5	4,529	1,825
11	17/10/2017	550	ÁGUA (22,5°)	3,77	3,55	-220	0,1966	19,24	151,12	37	42,0	108,0	4,681	1,820
12	17/10/2017	550	ÁGUA (22,5°)	3,77	3,55	-220	0,1987	17,81	139,89	37	42,5	107,5	4,675	1,848
13	17/10/2017	800	AR	3,66	3,43	-230	0,1931	7,58	59,54	37	41,3	483,0	4,676	0,400
14	17/10/2017	800	AR	3,72	3,47	-250	0,1938	6,99	54,90	37	42,0	774,0	4,614	0,250
15	17/10/2017	800	AR	3,68	3,42	-260	0,1951	6,71	52,71	37	42,5	472,0	4,591	0,413
16	17/10/2017	800	ÁGUA (22,5°)	3,84	3,44	-400	0,1987	5,44	42,73	37	42,9	564,0	4,632	0,352
17+	17/10/2017	800	ÁGUA (22,5°)	3,72	3,40	-320	0,1964	0	0,00	37	41,9	0,0	4,687	0,000
18	17/10/2017	800	ÁGUA (22,5°)	3,65	3,31	-340	0,1922	6,34	49,80	37	40,9	537,0	4,699	0,358
19	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,74	NÃO	NÃO	0,1965	18,26	143,43	28	42,0	NÃO	4,679	NÃO
20	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,76	NÃO	NÃO	0,1971	17,62	138,40	28	42,2	NÃO	4,671	NÃO
21	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,71	NÃO	NÃO	0,1940	19,33	151,83	28	43,1	NÃO	4,501	NÃO
22	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,66	NÃO	NÃO	0,1930	25,25	198,33	36	41,8	NÃO	4,617	NÃO
23	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,77	NÃO	NÃO	0,1945	22,7	178,30	36	41,2	NÃO	4,721	NÃO
24	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,66	NÃO	NÃO	0,1931	22,51	176,81	36	40,6	NÃO	4,756	NÃO

* CP rompeu ao sofrer uma queda

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 2 - Média e desvio padrão resultados dos ensaios do Lote 01 (aglomerante: CP-IV; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 horas)

CP	Data concretagem	Temperatura de queima [°]	Modo de Resfriamento	Peso íntegro [kg]		Peso fissurado [kg]		Perda de massa [gr]		Comp. CP [m]	F _{cj} [MPa]		Carga ruptura [kN]		Idade CP ensaiado [dias]	Tempo pulso íntegro [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPU íntegro [m/s]		VPU fissurado [m/s]		
				Média	DP	Média	DP	Média	DP		Média	DP	Média	DP				Média	DP	Média	DP	
1																						
2	17/10/2017	300	AR	3,70	0,06	3,60	0,06	-100	10,0	0,1949	20,15	0,34	158,30	2,65	36	41,53	47,43	4,69	0,10	4,11	0,09	
3																						
4																						
5	17/10/2017	300	ÁGUA (23,6°)	3,76	0,05	3,64	0,04	-120	10,0	0,1966	21,03	1,57	165,18	12,33	36	41,97	49,13	4,68	0,01	4,01	0,14	
6																						
7																						
8	17/10/2017	550	AR	3,65	0,06	3,45	0,06	-200	0,0	0,1930	19,76	0,52	155,21	4,09	37	42,50	87,97	4,54	0,07	2,20	0,12	
9																						
10																						
11	17/10/2017	550	ÁGUA (22,5°)	3,72	0,08	3,53	0,04	-197	40,4	0,1959	18,36	0,77	144,21	6,05	37	42,33	107,00	4,63	0,09	1,83	0,02	
12																						
13																						
14	17/10/2017	800	AR	3,69	0,03	3,44	0,03	-247	15,3	0,1940	7,09	0,44	55,72	3,49	37	41,93	576,33	4,63	0,04	0,35	0,09	
15																						
16																						
17*	17/10/2017	800	ÁGUA (22,5°)	3,74	0,10	3,38	0,07	-353	41,6	0,1958	3,93	3,43	30,84	26,94	37	41,90	367,00	4,67	0,04	0,24	0,21	
18																						
19																						
20	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,737	0,03	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1959	18,40	0,86	144,55	6,79	28	42,43	NÃO	4,62	0,10	NÃO	NÃO	
21																						
22																						
23	17/10/2017	NÃO	NÃO	3,697	0,06	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1935	23,49	1,53	184,48	12,02	36	41,20	NÃO	4,70	0,07	NÃO	NÃO	
24																						

* CP rompeu ao sofrer uma queda

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 3 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 02 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 horas)

CP	Data concretagem	Temperatura de queima [°]	Modo de Resfriamento	Peso integro [kg]	Peso fissurado [kg]	Perda de massa [gr]	Altura CP [m]	F _{cj} [MPa]	Carga ruptura [kN]	Idade CP ensaiado [dias]	Tempo pulso integro [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPU integro [m/s]	VPU fissurado [m/s]
1	30/01/2018	300	AR	3,85	3,69	-160	0,2000	21,91	172,10	31	42,5	48,1	4,706	4,158
2	30/01/2018	300	AR	3,75	3,62	-130	0,1960	24,19	190,01	31	41,1	45,5	4,769	4,308
3	30/01/2018	300	AR	3,8	3,67	-130	0,1990	26,48	207,99	31	42,5	47,2	4,682	4,216
4	30/01/2018	300	ÁGUA (23,1°)	3,86	3,69	-170	0,1990	24,34	191,18	31	42,0	53,3	4,738	3,734
5	30/01/2018	300	ÁGUA (23,1°)	3,82	3,63	-190	0,2000	28,32	222,45	31	42,0	53,2	4,762	3,759
6	30/01/2018	300	ÁGUA (23,1°)	3,79	3,6	-190	0,1980	28,24	221,82	31	42,0	53,7	4,714	3,687
7	30/01/2018	550	AR	3,82	3,58	-240	0,2000	21,58	169,50	31	42,0	87,7	4,762	2,281
8	30/01/2018	550	AR	3,8	3,58	-220	0,1990	20,95	164,56	31	42,0	76,5	4,738	2,601
9	30/01/2018	550	AR	3,84	3,62	-220	0,1990	21,74	170,76	31	42,1	82,0	4,727	2,427
10	30/01/2018	550	ÁGUA (23,1°)	3,76	3,51	-250	0,1950	16,28	127,87	31	41,0	120,5	4,756	1,618
11	30/01/2018	550	ÁGUA (23,1°)	3,81	3,56	-250	0,2000	17,16	134,79	31	42,4	113,5	4,717	1,762
12	30/01/2018	550	ÁGUA (23,1°)	3,8	3,55	-250	0,2000	14,83	116,49	31	42,5	112,7	4,706	1,775
13	30/01/2018	800	AR	3,79	3,51	-280	0,1990	8,52	66,92	31	42,5	293,0	4,682	0,679
14	30/01/2018	800	AR	3,86	3,58	-280	0,1990	9,23	72,50	31	41,6	244,0	4,784	0,816
15	30/01/2018	800	AR	3,82	3,55	-270	0,2000	9,42	73,99	31	42,9	246,0	4,662	0,813
16	30/01/2018	800	ÁGUA (23,1°)	3,86	3,57	-290	0,2000	7,54	59,22	31	42,3	314,0	4,728	0,637
17	30/01/2018	800	ÁGUA (23,1°)	3,85	3,56	-290	0,2000	7,18	56,40	31	41,6	325,0	4,808	0,615
18	30/01/2018	800	ÁGUA (23,1°)	3,81	3,52	-290	0,1980	8,02	62,99	31	42,0	303,0	4,714	0,653
19	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,86	NÃO	NÃO	0,2000	29,41	231,01	28	42,4	NÃO	4,717	NÃO
20	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,8	NÃO	NÃO	0,1990	30,79	241,85	28	42,5	NÃO	4,682	NÃO
21	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,86	NÃO	NÃO	0,2000	30,14	236,74	28	42,0	NÃO	4,762	NÃO
22	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,79	NÃO	NÃO	0,2000	31,62	248,37	31	45,1	NÃO	4,435	NÃO
23	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,87	NÃO	NÃO	0,1990	29,46	231,40	31	42,0	NÃO	4,738	NÃO
24	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,85	NÃO	NÃO	0,2050	30,99	243,42	31	42,8	NÃO	4,790	NÃO

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 4 - Média e desvio padrão (DP) resultados dos ensaios do Lote 02 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar; tempo de reidratação: 24 horas)

CP	Data concretagem	Temperatura de queima [°]	Modo de Resfriamento	Peso Inteiro [kg]		Peso fissurado [kg]		Perda de massa [gr]		Comp. CP [m]	Fcj [MPa]		Carga ruptura [KN]		Idade CP ensaiado [dias]	Tempo pulso inteiro [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPU Inteiro [m/s]		VPU fissurado [m/s]		
				Média	DP	Média	DP	Média	DP		Média	DP	Média	DP				Média	DP	Média	DP	
1																						
2	30/01/2018	300	AR	3,80	0,05	3,66	0,04	-140	17,3	0,1983	24,19	2,29	190,03	17,95	31	42,03	46,93	4,72	0,04	4,23	0,08	
3																						
4																						
5	30/01/2018	300	ÁGUA (23,1°)	3,82	0,04	3,64	0,05	-183	11,5	0,1990	26,97	2,28	211,82	17,87	31	42,00	53,40	4,74	0,02	3,73	0,04	
6																						
7																						
8	30/01/2018	550	AR	3,82	0,02	3,59	0,02	-227	11,5	0,1993	21,42	0,42	168,27	3,28	31	42,03	82,07	4,74	0,02	2,44	0,16	
9																						
10																						
11	30/01/2018	550	ÁGUA (23,1°)	3,79	0,03	3,54	0,03	-250	0,0	0,1983	16,09	1,18	126,38	9,24	31	41,97	115,57	4,73	0,03	1,72	0,09	
12																						
13																						
14	30/01/2018	800	AR	3,82	0,04	3,55	0,04	-277	5,8	0,1993	9,06	0,47	71,14	3,73	31	42,33	261,00	4,71	0,07	0,77	0,08	
15																						
16																						
17	30/01/2018	800	ÁGUA (23,1°)	3,84	0,03	3,55	0,03	-290	0,0	0,1993	7,58	0,42	59,54	3,31	31	41,97	314,00	4,75	0,05	0,64	0,02	
18																						
19																						
20	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,840	0,03	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1997	30,11	0,69	236,53	5,42	28	42,30	NÃO	4,72	0,04	NÃO	NÃO	
21																						
22																						
23	30/01/2018	NÃO	NÃO	3,837	0,04	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,2013	30,69	1,11	241,06	8,73	31	43,30	NÃO	4,65	0,19	NÃO	NÃO	
24																						

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 5 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 03 (aglomerante: CP-V; AR; resfriamento: ar e água; tempo de reidratação: 30 dias)

CP	Data concretagem	Temperatura de queima [°]	Modo de resfriamento	Processo de reidratação	Peso integral [kg]	Peso fissurado [kg]	Perda de massa [gr]	Peso após reidratação [kg]	Ganho de massa [gr]	Saldo de massa total [gr]	Altura CP [m]	FcI [MPa]	Carga ruptura [KN]	Idade CP ensaiado [dias]	Tempo pulso integral [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPU integral [m/s]	VPU fissurado [m/s]
1	15/02/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,77	3,62	-150	3,66	40,00	-110,00	0,1980	28,16	221,19	36	42,0	44,2	4,714	4,480
2	15/02/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,81	3,68	-130	3,73	50,00	-80,00	0,1990	29,28	229,99	36	42,4	43,8	4,693	4,543
3	15/02/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,79	3,66	-130	3,7	40,00	-90,00	0,2010	28,03	220,17	36	42,8	44,4	4,696	4,527
4	15/02/2018	300	ÁGUA	Umidade do ar	3,78	3,64	-140	3,66	20,00	-120,00	0,2000	27,84	219,96	36	42,7	53,1	4,684	3,766
5	15/02/2018	300	ÁGUA	Umidade do ar	3,75	3,61	-140	3,63	20,00	-120,00	0,2000	25,83	202,89	36	42,1	49,7	4,751	4,024
6	15/02/2018	300	ÁGUA	Umidade do ar	3,77	3,62	-150	3,64	20,00	-130,00	0,2000	24,48	192,28	36	41,3	49,9	4,843	4,008
7	15/02/2018	300	AR	Câmara úmida	3,73	3,57	-160	3,59	20,00	-140,00	0,1980	31,49	247,34	36	40,5	44,7	4,889	4,430
8	15/02/2018	300	AR	Câmara úmida	3,73	3,59	-140	3,61	20,00	-120,00	0,1980	31,04	243,81	36	41,0	42,5	4,829	4,659
9	15/02/2018	300	AR	Câmara úmida	3,77	3,64	-130	3,66	20,00	-110,00	0,1970	28,92	227,16	36	42,0	42,6	4,690	4,624
10	15/02/2018	300	AR	Umidade do ar	3,83	3,68	-150	3,74	60,00	-90,00	0,2000	24,06	188,98	36	42,5	52,3	4,706	3,824
11	15/02/2018	300	AR	Umidade do ar	3,75	3,59	-160	3,66	70,00	-90,00	0,1980	25,23	198,17	36	42,1	49,2	4,703	4,024
12	15/02/2018	300	AR	Umidade do ar	3,8	3,65	-150	3,71	60,00	-90,00	0,1980	23,72	186,31	36	42,7	49,7	4,637	3,984
13	15/02/2018	550	ÁGUA	Câmara úmida	3,78	3,58	-200	3,65	70,00	-130,00	0,1990	24,81	194,88	36	42,6	56,0	4,671	3,554
14	15/02/2018	550	ÁGUA	Câmara úmida	3,8	3,63	-170	3,7	70,00	-100,00	0,1980	24,54	192,75	36	42,0	53,7	4,714	3,687
15	15/02/2018	550	ÁGUA	Câmara úmida	3,76	3,54	-220	3,61	70,00	-150,00	0,1950	20,84	163,69	36	42,0	54,5	4,643	3,578
16	15/02/2018	550	AR	Câmara úmida	3,75	3,57	-180	3,61	40,00	-140,00	0,1970	25,03	196,60	36	42,1	54,0	4,679	3,648
17	15/02/2018	550	AR	Câmara úmida	3,72	3,56	-160	3,59	30,00	-130,00	0,1980	21,82	171,39	36	41,5	52,1	4,771	3,800
18	15/02/2018	550	AR	Câmara úmida	3,8	3,62	-180	3,65	30,00	-150,00	0,1990	24,08	189,14	36	41,9	51,5	4,749	3,864
19	15/02/2018	550	ÁGUA	Umidade do ar	3,75	3,52	-230	3,57	50,00	-180,00	0,1980	17,98	141,23	36	40,8	81,2	4,833	2,438
20	15/02/2018	550	ÁGUA	Umidade do ar	3,75	3,53	-220	3,57	40,00	-180,00	0,2000	17,23	135,34	36	41,0	85,6	4,878	2,336
21	15/02/2018	550	ÁGUA	Umidade do ar	3,84	3,62	-220	3,65	20,00	-190,00	0,2000	17,33	136,04	36	41,6	87,5	4,808	2,286
22	15/02/2018	550	AR	Umidade do ar	3,77	3,54	-230	3,56	30,00	-210,00	0,1990	17,6	138,24	36	41,5	86,3	4,795	2,306
23	15/02/2018	550	AR	Umidade do ar	3,8	3,57	-230	3,61	40,00	-190,00	0,1990	16,56	130,07	36	42,0	81,8	4,738	2,433
24	15/02/2018	550	AR	Umidade do ar	3,78	3,55	-230	3,59	40,00	-190,00	0,1990	17,7	139,03	36	42,0	76,2	4,738	2,612
25	15/02/2018	800	ÁGUA	Umidade do ar	3,82	3,52	-300	3,59	70,00	-230,00	0,1990	9,1	71,48	36	43,0	152,0	4,628	1,309
26	15/02/2018	800	ÁGUA	Umidade do ar	3,73	3,5	-230	3,57	70,00	-160,00	0,1980	9,61	75,48	36	40,5	160,2	4,889	1,236
27	15/02/2018	800	ÁGUA	Umidade do ar	3,78	3,55	-230	3,62	70,00	-160,00	0,1980	8,71	68,41	36	42,8	147,1	4,626	1,346
28	15/02/2018	800	AR	Câmara úmida	3,75	3,56	-190	3,61	50,00	-140,00	0,1980	14,82	116,41	36	42,2	79,1	4,692	2,503
29	15/02/2018	800	AR	Câmara úmida	3,79	3,57	-220	3,62	50,00	-170,00	0,1990	13,69	107,53	36	42,7	76,2	4,660	2,612
30	15/02/2018	800	AR	Câmara úmida	3,79	3,51	-280	3,56	50,00	-230,00	0,2000	11,5	90,33	36	42,9	88,0	4,662	2,273
31	15/02/2018	800	ÁGUA	Câmara úmida	3,79	3,58	-210	3,66	80,00	-130,00	0,1980	16,12	126,62	36	42,7	93,9	4,637	2,109
32	15/02/2018	800	ÁGUA	Câmara úmida	3,78	3,5	-280	3,57	70,00	-210,00	0,1980	17,33	136,12	36	42,7	84,5	4,637	2,343
33	15/02/2018	800	ÁGUA	Câmara úmida	3,82	3,55	-270	3,62	70,00	-200,00	0,2000	16,25	127,64	36	42,7	81,9	4,684	2,442
34	15/02/2018	800	AR	Umidade do ar	3,74	3,52	-220	3,57	50,00	-170,00	0,1970	5,88	46,19	36	40,9	154,7	4,817	1,273
35	15/02/2018	800	AR	Umidade do ar	3,77	3,5	-270	3,55	50,00	-220,00	0,1990	8,25	64,80	36	41,5	215,6	4,795	0,915
36	15/02/2018	800	AR	Umidade do ar	3,79	3,47	-320	3,52	50,00	-270,00	0,1990	6,92	54,35	36	41,6	205,5	4,784	0,968
37	15/02/2018	NÃO	NÃO	FCI 30	3,73	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1970	26,9	211,29	30	40,5	NÃO	4,864	NÃO
38	15/02/2018	NÃO	NÃO	FCI 30	3,76	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1970	24,3	190,87	30	41,0	NÃO	4,805	NÃO
39	15/02/2018	NÃO	NÃO	FCI 30	3,81	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,2000	38,6	303,19	30	40,2	NÃO	4,975	NÃO
40	15/02/2018	NÃO	NÃO	FCI 58	3,78	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1990	33,92	258,58	60	42,5	NÃO	4,682	NÃO
41	15/02/2018	NÃO	NÃO	FCI 58	3,79	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1980	33,9	266,27	60	42,8	NÃO	4,626	NÃO
42	15/02/2018	NÃO	NÃO	FCI 58	3,73	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1960	37,92	297,85	60	40,5	NÃO	4,840	NÃO

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 7 - Resultados unitários dos ensaios do Lote 04 (aglomerante: CP-V ARI; resfriamento: ao ar e água; tempo de reidratação: 90 dias)

CP	Data concretagem	Temperatura de queima [°]	Modo de resfriamento	Processo de reidratação	Peso inteiro [kg]	Peso fissurado [kg]	Perda de massa [gr]	Peso após reidratação [kg]	Ganho de massa [gr]	Saldo de massa total [gr]	Altura CP [m]	FcJ [MPa]	Carga ruptura [KN]	Idade CP ensaiado [dias]	Tempo pulso inteiro [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPJ inteiro [m/s]	VPJ fissurado [m/s]
1	03/01/2018	300	ÁGUA	Camara úmida	3,71	3,58	-130	3,69	110	-20	0,1950	24,5	192,44	90	40,5	45,1	4,815	4,324
2	03/01/2018	300	ÁGUA	Camara úmida	3,81	3,73	-80	3,85	120	40	0,2000	25,42	199,67	90	42,4	46,1	4,717	4,338
3	03/01/2018	300	ÁGUA	Camara úmida	3,66	3,52	-140	3,66	140	0	0,1920	29,02	227,94	90	40,5	42,5	4,741	4,318
4	03/01/2018	300	AR	Unidade do ar	3,75	3,58	-170	3,63	50	-120	0,1970	23,04	180,97	90	42,1	46,9	4,679	4,200
5	03/01/2018	300	AR	Unidade do ar	3,77	3,63	-140	3,62	30	-110	0,1980	23,35	183,41	90	42,0	47,0	4,714	4,213
6	03/01/2018	300	AR	Unidade do ar	3,76	3,58	-180	3,66	40	-140	0,1970	16,51	129,68	90	42,3	46,9	4,657	4,200
7	03/01/2018	300	ÁGUA	Unidade do ar	3,8	3,61	-190	3,66	50	-140	0,1990	22,4	175,95	90	41,9	52,3	4,749	3,805
8	03/01/2018	300	ÁGUA	Unidade do ar	3,75	3,59	-160	3,64	50	-110	0,1970	23,46	184,27	90	42,6	52,1	4,624	3,781
9	03/01/2018	300	ÁGUA	Unidade do ar	3,78	3,61	-170	3,67	60	-110	0,1980	23,28	182,86	90	42,7	54,0	4,637	3,667
10	03/01/2018	300	AR	Camara úmida	3,73	3,54	-190	3,73	190	0	0,1960	20,9	164,16	90	41,6	48,9	4,712	4,008
11	03/01/2018	300	AR	Camara úmida	3,82	3,68	-140	3,84	160	20	0,2000	21,42	168,25	90	42,1	46,9	4,751	4,264
12	03/01/2018	300	AR	Camara úmida	3,81	3,63	-180	3,79	160	-20	0,1990	22,74	178,62	90	42,1	46,2	4,727	4,307
13	03/01/2018	550	ÁGUA	Camara úmida	3,82	3,51	-310	3,73	220	-90	0,1990	17,27	135,65	90	42,7	59,7	4,660	3,333
14	03/01/2018	550	ÁGUA	Camara úmida	3,82	3,49	-330	3,7	210	-120	0,2000	16,94	133,06	90	43,0	58,4	4,651	3,425
15	03/01/2018	550	ÁGUA	Camara úmida	3,81	3,54	-270	3,72	180	-90	0,1990	17,76	139,50	90	41,5	64,2	4,795	3,100
16	03/01/2018	550	ÁGUA	Unidade do ar	3,75	3,56	-190	3,63	70	-120	0,1980	16,46	129,29	90	42,1	98,0	4,703	2,020
17	03/01/2018	550	ÁGUA	Unidade do ar	3,72	3,56	-160	3,64	80	-80	0,1950	18,03	141,62	90	41,5	85,5	4,699	2,281
18	03/01/2018	550	ÁGUA	Unidade do ar	3,79	3,59	-200	3,65	60	-140	0,2000	17,14	134,63	90	42,8	88,5	4,673	2,260
19	03/01/2018	550	AR	Camara úmida	3,78	3,53	-230	3,72	190	-60	0,2000	17,2	135,10	90	42,7	55,1	4,684	3,630
20	03/01/2018	550	AR	Camara úmida	3,72	3,5	-220	3,66	160	-60	0,1940	14,97	117,58	90	41,8	54,7	4,641	3,547
21	03/01/2018	550	AR	Camara úmida	3,73	3,58	-150	3,68	100	-50	0,1960	14,79	116,17	90	40,5	53,1	4,840	3,691
22	03/01/2018	550	AR	Unidade do ar	3,84	3,49	-330	3,62	130	-220	0,2000	14,96	117,51	90	41,5	84,1	4,819	2,378
23	03/01/2018	550	AR	Unidade do ar	3,77	3,54	-230	3,58	40	-190	0,1970	14,59	114,60	90	41,3	80,1	4,770	2,459
24	03/01/2018	550	AR	Unidade do ar	3,77	3,53	-240	3,56	30	-210	0,1990	14,85	116,64	90	42,2	91,2	4,716	2,182
25	03/01/2018	800	ÁGUA	Camara úmida	3,7	3,41	-290	3,63	220	-70	0,1950	6,29	49,41	90	42,0	157,0	4,643	1,242
26	03/01/2018	800	ÁGUA	Camara úmida	3,69	3,43	-260	3,63	200	-60	0,1930	9,64	75,72	90	40,4	109,4	4,777	1,764
27	03/01/2018	800	ÁGUA	Camara úmida	3,77	3,5	-270	3,71	210	-60	0,1970	8,33	65,43	90	41,5	116,8	4,747	1,687
28	03/01/2018	800	ÁGUA	Unidade do ar	3,76	3,47	-290	3,55	80	-210	0,1960	4,71	37,00	90	41,0	295,0	4,780	0,664
29	03/01/2018	800	ÁGUA	Unidade do ar	3,78	3,49	-290	3,59	100	-190	0,1970	6,5	51,06	90	42,0	380,0	4,690	0,518
30	03/01/2018	800	ÁGUA	Unidade do ar	3,79	3,47	-320	3,58	110	-210	0,2000	6,12	48,07	90	41,5	424,0	4,819	0,472
31	03/01/2018	800	AR	Camara úmida	3,83	3,53	-300	3,78	250	-50	0,2000	6,4	50,27	90	41,0	159,1	4,878	1,438
32	03/01/2018	800	AR	Camara úmida	3,84	3,56	-280	3,76	200	-80	0,1990	6,73	52,86	90	40,6	145,3	4,901	1,370
33	03/01/2018	800	AR	Camara úmida	3,77	3,5	-270	3,71	210	-60	0,1990	7,32	57,50	90	41,5	147,0	4,795	1,354
34	03/01/2018	800	AR	Unidade do ar	3,77	3,47	-300	3,57	100	-200	0,1980	5,14	40,37	90	40,5	344,0	4,889	0,576
35	03/01/2018	800	AR	Unidade do ar	3,83	3,54	-300	3,65	110	-190	0,2000	5,29	41,55	90	41,0	294,0	4,878	0,680
36	03/01/2018	800	AR	Unidade do ar	3,83	3,54	-290	3,63	90	-200	0,2050	5,56	43,67	90	42,0	299,0	4,881	0,686
37	03/01/2018	NÃO	NÃO	FCJ	3,78	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1980	28,11	220,80	34	41,9	NÃO	4,726	NÃO
38	03/01/2018	NÃO	NÃO	FCJ	3,8	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1990	31,01	243,57	34	42,0	NÃO	4,738	NÃO
39	03/01/2018	NÃO	NÃO	FCJ	3,84	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,2000	31,52	247,58	34	42,1	NÃO	4,751	NÃO
40	03/01/2018	NÃO	NÃO	FCJ	3,72	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1980	35,65	280,02	120	41,7	NÃO	4,748	NÃO
41	03/01/2018	NÃO	NÃO	FCJ	3,81	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1980	34,54	271,30	120	42,3	NÃO	4,681	NÃO
42	03/01/2018	NÃO	NÃO	FCJ	3,83	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1990	33,13	260,23	120	41,8	NÃO	4,761	NÃO

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 8 - Média e desvio padrão (DP) resultados dos ensaios do Lote 04 (aglomerante: CP-V; ARI; refinação: ao ar e água; tempo de hidratação: 90 dias)

CP	Data concretagem de queima [°]	Temperatura de queima [°]	Modo de refinação	Processo de hidratação	Peso inteiro [kg]		Peso fissurado [kg]		Perda de massa [g]		Peso pós hidratação [kg]		Ganho de massa pós cura [g]		Saldo de massa final [g]		Comp. CP [m]	F _{cj} [MPa]		Carga ruptura [kN]		Idade CP ensado [dias]	Tempo pulso inteiro [µs]	Tempo pulso fissurado [µs]	VPU inteiro [m/s]		VPU fissurado [m/s]	
					Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP		Média	DP	Média	DP				Média	DP		
1	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,73	0,08	3,61	0,11	-117	32,15	3,73	0,10	123	15,28	7	30,55	0,1957	26,31	2,39	206,68	18,76	90	41,13	44,57	4,76	0,05	4,39	0,11
2	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,76	0,01	3,60	0,03	-163	20,82	3,64	0,02	40	10,00	-123	15,28	0,1973	20,97	3,86	164,69	30,34	90	42,13	46,93	4,68	0,03	4,20	0,01
3	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,78	0,03	3,60	0,01	-173	15,28	3,66	0,02	53	5,77	-120	17,32	0,1980	23,05	0,57	181,02	4,46	90	42,40	52,80	4,67	0,07	3,75	0,07
4	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,79	0,05	3,62	0,07	-170	26,46	3,79	0,06	170	17,32	0	20,00	0,1983	21,69	0,95	170,34	7,45	90	41,93	47,33	4,73	0,02	4,19	0,16
5	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,82	0,01	3,51	0,03	-303	30,55	3,72	0,02	203	20,82	-100	17,32	0,1993	17,32	0,41	136,07	3,24	90	42,40	60,77	4,70	0,08	3,29	0,17
6	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,75	0,04	3,57	0,02	-183	20,82	3,64	0,01	70	10,00	-113	30,55	0,1977	17,21	0,79	135,18	6,18	90	42,13	90,67	4,69	0,02	2,19	0,14
7	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,74	0,03	3,54	0,04	-207	51,32	3,69	0,03	150	45,83	-57	5,77	0,1967	15,65	1,34	122,95	10,54	90	41,67	54,30	4,72	0,10	3,62	0,07
8	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,79	0,04	3,52	0,03	-273	66,58	3,59	0,03	67	35,08	-207	15,28	0,1987	14,80	0,19	116,25	1,49	90	41,67	85,13	4,77	0,05	2,34	0,14
9	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,72	0,04	3,45	0,05	-273	15,28	3,66	0,05	210	10,00	-63	5,77	0,1950	8,09	1,69	63,52	13,26	90	41,30	127,73	4,72	0,07	1,56	0,28
10	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,78	0,02	3,48	0,01	-300	17,32	3,57	0,02	97	15,28	-203	11,55	0,1977	5,78	0,94	45,37	7,41	90	41,50	366,33	4,76	0,07	0,55	0,10
11	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,81	0,04	3,53	0,03	-283	15,28	3,75	0,04	220	26,46	-63	15,28	0,1993	6,82	0,47	53,54	3,66	90	41,03	143,80	4,86	0,06	1,39	0,04
12	03/01/2018	300	ÁGUA	Câmara úmida	3,81	0,04	3,52	0,04	-297	5,77	3,62	0,04	100	10,00	-197	5,77	0,2010	5,33	0,21	41,87	1,67	90	41,17	312,33	4,88	0,01	0,65	0,06
13	03/01/2018	800	AR	Umidade do ar	3,81	0,03	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1990	30,21	1,84	237,52	14,45	34	42,00	NÃO	4,74	0,01	NÃO	NÃO
14	03/01/2018	800	AR	Umidade do ar	3,81	0,03	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	0,1983	34,44	1,26	270,52	9,92	120	41,93	NÃO	4,73	0,04	NÃO	NÃO

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 9 - Resultados unitários dos ensaios de absorção de água e índice de vazios

Temperatura de queima	Origem do CP	CP	Massa submersa [kg]	Massa seca [kg]	Massa pós queima [kg]	Massa saturada [kg]	Diferença seca/sat [gr]	Absorção por imersão [%]	Índice de vazios [%]	Massa espec. da amostra seca [kg/m ³]	Massa espec. da amostra saturada [kg/m ³]	
Integros	Lote 1	1	2,385	3,864	---	3,932	68	1,76%	4,4%	2,498	2,542	
		2	2,221	3,799	---	3,859	60	1,58%	3,7%	2,319	2,356	
		3	2,462	3,745	---	3,809	64	1,71%	4,8%	2,780	2,828	
		4	2,413	3,732	---	3,851	119	3,19%	8,3%	2,595	2,678	
		5	2,273	3,666	---	3,771	105	2,86%	7,0%	2,447	2,517	
		6	2,391	3,688	---	3,792	104	2,82%	7,4%	2,632	2,707	
	Lote 2	7	2,347	3,810	3,663	3,904	94	2,47%	6,0%	2,447	2,507	
		8	2,303	3,811	3,658	3,856	45	1,18%	2,9%	2,454	2,483	
		9	2,218	3,781	3,744	3,855	74	1,96%	4,5%	2,310	2,355	
		10	2,245	3,740	3,613	3,845	105	2,81%	6,6%	2,338	2,403	
	300°C	Lote 4	11	2,392	3,719	3,517	3,798	79	2,12%	5,6%	2,645	2,701
			12	2,363	3,724	3,523	3,804	80	2,15%	5,6%	2,584	2,640
13			2,369	3,748	3,563	3,823	75	2,00%	5,2%	2,578	2,629	
14			2,402	3,714	3,437	3,787	73	1,97%	5,3%	2,682	2,734	
500°C	Lote 4	15	2,418	3,767	3,532	3,856	89	2,36%	6,2%	2,620	2,682	
		16	2,304	3,781	3,531	3,901	120	3,17%	7,5%	2,368	2,443	
		17	2,402	3,780	3,541	3,860	80	2,12%	5,5%	2,593	2,647	
		18	2,480	3,771	3,530	3,813	42	1,11%	3,2%	2,829	2,860	
800°C	Lote 4	18	2,480	3,771	3,530	3,813	42	1,11%	3,2%	2,829	2,860	

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 10 - Médias e desvio padrão (DP) dos ensaios de absorção de água e índice de vazios

Temperatura de queima	Origem do CP	CP	Massa submersa [kg]		Massa seca [kg]		Massa pós queima [kg]		Massa saturada [kg]		Diferença seca/sat [gr]		Absorção por imersão [%]		Índice de vazios [%]		Massa espec. da amostra seca [kg/m ³]		Massa espec. da amostra saturada [kg/m ³]			
			Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP		
Integros	Lote 1	1																				
		2	2,356	0,101	3,803	0,049	---	---	3,867	0,051	64	3,266	1,68%	0,001	4,27%	0,005	2,532	0,190	2,575	0,194		
		3																				
	Lote 2	4																				
		5	2,359	0,061	3,695	0,027	---	---	3,805	0,034	109	6,848	2,96%	0,002	7,57%	0,005	2,558	0,080	2,634	0,083		
		6																				
300°C	Lote 1	7	2,347	0,000	3,810	0,000	3,663	0,000	3,904	0,000	94	0,000	2,47%	0,000	6,04%	0,000	2,447	0,000	2,507	0,000		
	Lote 2	8																				
	Lote 3	9	2,255	0,035	3,777	0,029	3,672	3,672	3,852	0,005	75	24,499	1,98%	0,007	4,66%	0,015	2,367	0,062	2,414	0,053		
	Lote 4	10																				
500°C	Lote 1	11	2,392	0,000	3,719	0,000	3,517	0,000	3,798	0,000	79	0,000	2,12%	0,000	5,62%	0,000	2,645	0,000	2,701	0,000		
	Lote 2	12																				
	Lote 3	13	2,378	0,017	3,729	0,014	3,508	3,508	3,805	0,015	76	2,944	2,04%	0,001	5,33%	0,002	2,615	0,047	2,668	0,047		
	Lote 4	14																				
800°C	Lote 1	15	2,418	0,000	3,767	0,000	3,532	0,000	3,856	0,000	89	0,000	2,36%	0,000	6,19%	0,000	2,620	0,000	2,682	0,000		
	Lote 2	16																				
	Lote 3	17	2,395	0,072	3,777	0,004	3,534	3,534	3,858	0,036	81	31,847	2,13%	0,008	5,38%	0,018	2,596	0,188	2,650	0,171		
	Lote 4	18																				

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 11 - Análise ANOVA sobre variação da massa ao longo da variação das temperaturas ensaiadas

CP-IV resf AR			
Integro	300°C	550°C	800°C
3,77	3,67	3,42	3,43
3,69	3,58	3,41	3,47
3,65	3,56	3,52	3,42
3,62			
3,61			
3,72			
3,66			
3,72			
3,68			

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	9	33,12	3,680	0,00265
300°C	3	10,81	3,603	0,00343
550°C	3	10,35	3,450	0,00370
800°C	3	10,32	3,440	0,00070

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,1997111	3	0,06657	25,27989	6,516E-06	3,343889
Dentro dos grupos	0,0368667	14	0,002633			

Total 0,2365778 17

CP-IV resf AGUA			
Integro	300°C	550°C	800°C
3,81	3,68	3,48	3,44
3,72	3,61	3,55	3,40
3,74	3,62	3,55	3,31
3,63			
3,77			
3,77			
3,84			
3,72			
3,65			

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	9	33,65	3,739	0,00471
300°C	3	10,91	3,637	0,00143
550°C	3	10,58	3,527	0,00163
800°C	3	10,15	3,383	0,00443

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,3212722	3	0,107091	28,45515	3,242E-06	3,343889
Dentro dos grupos	0,0526889	14	0,003763			

Total 0,3739611 17

CP-V resf AR			
Integro	300°C	550°C	800°C
3,85	3,69	3,58	3,51
3,75	3,62	3,58	3,58
3,8	3,67	3,62	3,55
3,83	3,68	3,54	3,52
3,75	3,59	3,57	3,5
3,8	3,65	3,55	3,47
3,75	3,58	3,49	3,47
3,77	3,63	3,54	3,54
3,76	3,58	3,53	3,54

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	9	34,06	3,784	0,00140
300°C	9	32,69	3,632	0,00184
550°C	9	32	3,556	0,00138
800°C	9	31,68	3,520	0,00135

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,3717639	3	0,123921	82,95986	3,515E-15	2,90112
Dentro dos grupos	0,0478	32	0,001494			

Total 0,4195639 35

CP-V resf AGUA			
Integro	300°C	550°C	800°C
3,86	3,69	3,51	3,57
3,82	3,63	3,56	3,56
3,79	3,6	3,55	3,52
3,78	3,64	3,52	3,52
3,75	3,61	3,53	3,5
3,77	3,62	3,62	3,55
3,8	3,61	3,56	3,47
3,75	3,59	3,56	3,49
3,78	3,61	3,59	3,47

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	9	34,1	3,789	0,00121
300°C	9	32,6	3,622	0,00087
550°C	9	32	3,556	0,00118
800°C	9	31,65	3,517	0,00140

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,3902083	3	0,130069	111,6875	4,926E-17	2,90112
Dentro dos grupos	0,0372667	32	0,001165			

Total 0,427475 35

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 12 - Análise ANOVA sobre variação da resistência mecânica ao longo da variação das temperaturas ensaiadas

CP-IV resf AR			
Integro	300°C	550°C	800°C
25,25	19,92	19,19	7,58
22,7	20,54	19,88	6,99
22,51	20,00	20,21	6,71

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	3	70,46	23,48667	2,341033
300°C	3	60,46	20,15333	0,113733
550°C	3	59,28	19,76	0,2709
800°C	3	21,28	7,093333	0,197233

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	468,67747	3	156,2258	213,7956	5,64E-08	4,066181
Dentro dos grupos	5,8458	8	0,730725			

Total 474,52327 11

CP-IV resf AGUA			
Integro	300°C	550°C	800°C
25,25	19,89	18,03	5,44
22,7	22,82	19,24	0
22,51	20,38	17,81	6,34

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	3	70,46	23,48667	2,341033
300°C	3	63,09	21,03	2,4631
550°C	3	55,08	18,36	0,5929
800°C	3	11,78	3,926667	11,76653

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	692,16416	3	230,7214	53,77003	1,203E-05	4,066181
Dentro dos grupos	34,327133	8	4,290892			

Total 726,49129 11

CP-V resf AR			
Integro	300°C	550°C	800°C
31,62	21,91	21,58	8,52
29,46	24,19	20,95	9,23
30,99	26,48	21,74	9,42
32,92			
33,9			
37,92			
35,65			
34,54			
33,13			

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	9	300,13	33,34778	6,477669
300°C	3	72,58	24,19333	5,221233
550°C	3	64,27	21,42333	0,174433
800°C	3	27,17	9,056667	0,225033

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1418,9445	3	472,9815	105,0024	7,788E-10	3,343889
Dentro dos grupos	63,062756	14	4,504483			

Total 1482,0072 17

CP-V resf AGUA			
Integro	300°C	550°C	800°C
31,62	24,34	16,28	7,54
29,46	28,32	17,16	7,18
30,99	28,24	14,83	8,02
32,92			
33,9			
37,92			
35,65			
34,54			
33,13			

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	9	300,13	33,34778	6,477669
300°C	3	80,9	26,96667	5,176133
550°C	3	48,27	16,09	1,3843
800°C	3	22,74	7,58	0,1776

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1787,0742	3	595,6914	127,7184	2,092E-10	3,343889
Dentro dos grupos	65,297422	14	4,664102			

Total 1852,3716 17

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 13 - Análise ANOVA sobre variação da VPU mecânica ao longo da variação do processo de resfriamento

CP IV AR			
íntegro	300°C	550°C	800°C
4,693	4,036	2,283	0,400
4,543	4,215	2,249	0,250
4,627	4,080	2,066	0,413

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
íntegro	3	13,863	4,621	0,005652
300	3	12,331	4,110333	0,008700333
550	3	6,598	2,199333	0,013622333
800	3	1,063	0,354333	0,008206333

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	34,11988225	3	11,37329	1257,377528	4,93247E-11	4,066181
Dentro dos grupo	0,072362	8	0,009045			

Total 34,19224425 11

CP V AR			
íntegro	300°C	550°C	800°C
4,695	4,158	2,281	0,679
4,756	4,308	2,601	0,816
4,797	4,216	2,427	0,813

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
4,695	2	9,553	4,7765	0,0008405
4,158	2	8,524	4,262	0,004232
2,281	2	5,028	2,514	0,015138
0,679	2	1,629	0,8145	4,5E-06

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	19,4550605	3	6,48502	1283,209531	2,01944E-06	6,591382
Dentro dos grupo	0,020215	4	0,005054			

Total 19,4752755 7

CP IV AGUA			
íntegro	300°C	550°C	800°C
4,685	3,864	1,825	0,352
4,628	4,002	1,820	0,358
4,673	4,150	1,848	0,354

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
íntegro	3	13,986	4,662	0,000903
300	3	12,016	4,005333	0,020457333
550	3	5,493	1,831	0,000223
800	3	1,064	0,354667	9,33333E-06

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	35,42515892	3	11,80839	2187,480868	5,40593E-12	4,066181
Dentro dos grupo	0,043185333	8	0,005398			

Total 35,46834425 11

CP V AGUA			
íntegro	300°C	550°C	800°C
4,738	3,734	1,618	0,637
4,726	3,759	1,762	0,615
4,750	3,687	1,775	0,653

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
íntegro	3	14,214	4,738	0,000144
300	3	11,18	3,726667	0,001336333
550	3	5,155	1,718333	0,007592333
800	3	1,905	0,635	0,000364

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	31,30590567	3	10,4353	4423,299988	3,24219E-13	4,066181
Dentro dos grupo	0,018873333	8	0,002359			

Total 31,324779 11

(Fonte: autor do estudo)

Tabela 14 - Análise ANOVA sobre variação da resistência mecânica ao longo da variação do aglomerante conjugado com o processo de resfriamento

Ensaio	CP-IV resf AR			CP-V resf AR		
Integro	25,25	22,7	22,51	29,46	33,13	37,92
300°C	19,92	20,54	20,00	21,91	24,19	26,48
550°C	19,19	19,88	20,21	21,58	20,95	21,74
800°C	7,58	6,99	6,71	8,52	9,23	9,42

Anova: fator duplo sem repetição

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	6	170,97	28,495	38,23547
300°C	6	133,04	22,17333	7,030466667
550°C	6	123,55	20,59167	1,008136667
800°C	6	48,45	8,075	1,32531
CP-IV resf AR	4	71,94	17,985	55,4135
	4	70,11	17,5275	50,801025
	4	69,43	17,3575	51,679025
CP-V resf AR	4	81,47	20,3675	75,62875833
	4	87,5	21,875	97,5953
	4	95,56	23,89	139,1841333

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	1316,001246	3	438,6671	69,3333018	5,08033E-09	3,287382
Colunas	143,0929375	5	28,61859	4,523296244	0,010291052	2,901295
Erro	94,90397917	15	6,326932			
Total	1553,998163	23				

Ensaio	CP-IV resf AGUA			CP-V resf AGUA		
Integro	25,25	22,7	22,51	29,46	33,13	37,92
300°C	19,89	22,82	20,38	24,34	28,32	28,24
550°C	18,03	19,24	17,81	16,28	17,16	14,83
800°C	5,44	0	6,34	7,54	7,18	8,02

Anova: fator duplo sem repetição

RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
Integro	6	170,97	28,495	38,23547
300°C	6	143,99	23,99833	13,62889667
550°C	6	103,35	17,225	2,33675
800°C	6	34,52	5,753333	8,781706667
CP-IV resf AGUA	4	68,61	17,1525	70,33869167
	4	64,76	16,19	119,2518667
	4	67,04	16,76	51,9486
CP-V resf AGUA	4	77,62	19,405	92,00036667
	4	85,79	21,4475	135,2187583
	4	89,01	22,2525	179,659425

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Linhas	1762,160279	3	587,3868	48,12204079	6,2325E-08	3,287382
Colunas	131,8212708	5	26,36425	2,159908601	0,113836228	2,901295
Erro	183,0928458	15	12,20619			
Total	2077,074396	23				

(Fonte: autor do estudo)