

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Paulo Iuri de Borba Perin

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NO
SPALLING EXPLOSIVO EM CONCRETOS DE ALTA
RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Porto Alegre
julho de 2019

PAULO IURI DE BORBA PERIN

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NO
SPALLING EXPLOSIVO EM CONCRETOS DE ALTA
RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso 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

Porto Alegre
julho de 2019

PAULO IURI DE BORBA PERIN

**INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NO
SPALLING EXPLOSIVO EM CONCRETOS DE ALTA
RESISTÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

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 Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Prof. Jean Marie Désir (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Eng.^a Gabrielle Bacelo Bidinotto (UFRGS)
Bel. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Carlos e Clair, pelo apoio, em todos os momentos, em especial durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à professora Ângela Graeff, pelas orientações, pela disponibilidade em ensinar, pelo conhecimento transmitido durante o desenvolvimento desse trabalho, sem os quais ele não seria possível.

Ao bolsista Ronaldo, pelo auxílio constante e imprescindível com as práticas laboratoriais. Ao bolsista Victor, pela importante ajuda na etapa final dos ensaios.

Aos técnicos do LEME, Edgar e Fontes, cujas ideias e serviços na condução dos ensaios foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Ao LEME, pelo fornecimento dos materiais utilizados nessa pesquisa.

Agradeço aos demais membros da banca examinadora, prof. Jean e Gabrielle, por contribuir com seus conhecimentos e ideias construtivas sobre essa pesquisa.

Aos meus pais, Carlos e Clair, por tudo.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.

Sir Isaac Newton

RESUMO

Neste trabalho, são apresentados os resultados de um programa experimental sobre a influência da resistência do concreto na ocorrência de spalling explosivo e na resistência residual, para concretos de alta resistência. Corpos de prova de concretos de alta resistência, de três resistências iniciais diferentes, foram expostos às temperaturas de 300 °C e 600 °C, e ensaiados em ruptura à compressão, velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e perda de massa. Também foi analisada a influência do grau de saturação, através de ensaios em corpos de prova curados por cura ao ar e por cura em câmara úmida. Os resultados apontaram que concretos de resistências próximas à 100 MPa são altamente suscetíveis à falha por spalling explosivo, ao contrário dos de 50 MPa. Mostraram, também, que os concretos de resistências da ordem de 80 MPa apresentam os melhores resultados em termos de perda de resistência e alteração da VPU.

Palavras-chave: Spalling. Resistência ao fogo. Concretos de alta resistência. CAR. Segurança contra incêndios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens dos danos causados ao corpos de prova pelas altas temperaturas.....	8
Figura 2 – Imagens dos danos causados ao corpos de prova pelas altas temperaturas.....	9
Figura 3 – Resistência média à compressão em função da temperatura para cura ao ar...	12
Figura 4 – Resistência média à compressão em função da temperatura para cura úmida.....	12
Figura 5 – Perda relativa de resistência (%) em função da resistência de referência para o mesmo traço, para ambas as curas.....	13
Figura 6 – VPU em função da resistência, cura ao ar.....	15
Figura 7 – VPU em função da resistência, cura úmida.....	15
Figura 8 – Variação na VPU média para cada traço em função da resistência inicial de referência.....	16
Figura 9 – Perda de massa relativa (%) em função da resistência do mesmo corpo de prova, ambas as curas.....	18
Figura 10 – Fatores de redução resistência ($k_{c,\theta}$) obtidos nos ensaios desta pesquisa em comparação com os dados nas normas NBR 15200 [12] e EUROCODE 2 PART. 1-2 [13]	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumos de material, resistência esperada aos 56 dias e abatimento por traço.....	4
Tabela 2 – Granulometria do agregado graúdo.....	5
Tabela 3 – Granulometria do agregado miúdo.....	5
Tabela 4 - Temperatura e tipo de cura de cada aquecimento dos CPs.....	6
Tabela 5 - Panorama de danos analisados por inspeção visual.....	7
Tabela 6 - Resultados de resistência à compressão.....	11
Tabela 7 - Resultados de VPU.....	14
Tabela 8 - Resultados de massas inicial e residual.....	17

LISTA DE SIGLAS

CP – Corpo de Prova

CAR – Concreto de Alta Resistência

CC – Concreto Convencional

VPU – Velocidade de Pulso Ultrassônico

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

SCI – Segurança contra incêndios

LISTA DE SÍMBOLOS

$k_{c,\theta}$ – fator de redução da resistência

f_{ck} – resistência à compressão característica do concreto

m – metros

s – segundos

°C – graus Celsius

min – minutos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 JUSTIFICATIVA.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	3
2 MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	3
2.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	3
2.1.1 DOSAGEM E CONCRETAGEM.....	4
2.1.2 QUEIMAS	5
2.1.3 RUPTURAS À COMPRESSÃO.....	6
2.1.4 VELOCIDADE DE PULSO ULTRASSÔNICO.....	6
2.1.5 PESAGENS.....	7
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	7
3.1 AVALIAÇÃO VISUAL SOBRE A OCORRÊNCIA DO SPALLING EXPLOSIVO.....	7
3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	10
3.3 VELOCIDADE DO PULSO ULTRASSÔNICO (VPU).....	13
3.4 PERDA DE MASSA.....	17
3.5 NORMATIZAÇÃO.....	19
4 CONCLUSÕES.....	20
5 AGRADECIMENTOS.....	21
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

Influência da resistência à compressão no spalling explosivo em concretos de alta resistência em situação de incêndio

Influence of compressive strength on explosive spalling in high strength concrete exposed to fire

Resumo

Neste artigo, são apresentados os resultados de um programa experimental sobre a influência da resistência do concreto na ocorrência de spalling explosivo e na resistência residual, para concretos de alta resistência. Corpos de prova de concretos de alta resistência, de três resistências iniciais diferentes, foram expostos às temperaturas de 300 °C e 600 °C, e ensaiados em ruptura à compressão, Velocidade de Pulso Ultrassônico e perda de massa. Também foi analisada a influência do grau de saturação, através de ensaios em corpos de prova curados por cura ao ar e por cura em câmara úmida. Os resultados apontaram que concretos de resistências próximas à 100 MPa são altamente suscetíveis à falha por spalling explosivo, ao contrário dos de 50 MPa. Mostraram, também, que os concretos de resistências da ordem de 80 MPa apresentam os melhores resultados em termos de perda de resistência e alteração da VPU.

Abstract

This paper presents the results from an experimental program on the influence of compressive strength of concrete in the occurrence of explosive spalling and residual strength. Results of compressive strength, ultrasonic pulse velocity and weight loss were obtained for concrete test specimens of three different initial strengths, cured by two different methods, exposed to room temperature, 300 °C and 600 °C. The main results indicated that 100 MPa test specimens are more susceptible to explosive spalling failure, as opposed to 50 MPa, moist-cured test specimens are significantly more affected by explosive spalling. Results also showed that the test specimens with compressive strength of about 80 MPa presents the best results in terms of strength loss and UPV alteration.

Palavras-chave: *Spalling, resistência ao fogo, concretos de alta resistência, CAR, Segurança contra incêndios*

Keywords: *Spalling, fire endurance, high strength concrete, HSC, Fire safety engineering*

1 Introdução

O desenvolvimento de melhores técnicas de dosagem, em conjunto com a tecnologia de materiais, fez com que se tornasse mais econômico e, conseqüentemente, mais comum, o uso de concretos de alta resistência (CAR) em construções, especialmente nos elementos comprimidos.

Em relação ao concreto convencional (CC), o CAR apresenta inúmeras vantagens, dentre as quais se destacam: durabilidade, permeabilidade reduzida, resistência à abrasão e menor deformabilidade [1, 2 e 3]. Entretanto, no quesito resistência ao fogo, esse tem mostrado, consistentemente, clara desvantagem em relação ao CC [5], principalmente por ser significativamente mais suscetível ao spalling explosivo. Fenômeno caracterizado por deslocamentos violentos de camadas superficiais de concreto, resultando em maior exposição da armadura ao fogo, que pode levar à deformações diferenciadas entre essa e o concreto do entorno, causando a perda de aderência entre concreto e aço, para temperaturas mais elevadas, com possíveis conseqüências catastróficas [4, 5, 6 e 7].

Supõe-se que sejam duas as causas principais do spalling: Primeiramente, em altas temperaturas, devido à evaporação da água contida nos poros do concreto, e conseqüente confinamento do vapor formado, caso se trate de um concreto pouco permeável, são originadas poropressões no interior dos poros, que desenvolvem, em reação, tensões de tração transversais, que podem chegar à 8 MPa, superiores, em muitos casos, às resistências à tração mesmo dos CAR [7]. Secundariamente, também, pelo fato de o concreto possuir uma baixa condutividade térmica, ao ser exposto ao calor nas faces externas, ocorre um intenso gradiente de temperatura em direção a seu interior, gerando deformações restringidas de origem térmica, as quais originam tensões de compressão paralelas à superfície aquecida [8].

O spalling é, notoriamente, um fenômeno complexo e de difícil predição, por ser dependente de muitos fatores, sendo os principais: a umidade interna do concreto, a porosidade, as condições de carregamento, o tipo de agregado, a seção transversal [4] e taxa de aquecimento [6].

Paralelamente, ocorre a degradação do material à altas temperaturas. Segundo (Lima [18]), as alterações no concreto à altas temperaturas são causadas, principalmente, pelas movimentações térmicas diferenciais entre agregado e pasta de cimento, que geram o aparecimento de microfissuras, reduzindo a capacidade portante do material. A perda de resistência no concreto inicia de forma mais significativa à 300 °C, apresentando aproximadamente 10 % de perda, e se acentua radicalmente a partir dos 600 °C, onde a capacidade já é reduzida pela metade, podendo apenas parte dessa ser recuperada pós exposição [19].

1.1 Justificativa

É de interesse encontrar um traço de CAR que proporcione maior economia ao projeto estrutural e ainda apresente bom desempenho em situação de incêndio, mesmo sem o uso de fibras. Aliando assim, economia (tanto na segurança estrutural quanto na segurança contra incêndios), durabilidade, e mais importante, confiabilidade e segurança frente à ação das altas temperaturas.

1.2 Objetivos

Objetivos primários: Determinar a influência da resistência do concreto na ocorrência de spalling e na perda de resistência à altas temperaturas, para concretos de alta resistência. Fazer uma análise das principais normas de dimensionamento de estruturas de concreto em situação de incêndio, no concernente à resistência ao fogo do material concreto.

Objetivos secundários: Determinar a influência da cura do concreto e, conseqüentemente, da umidade interna, na ocorrência de spalling explosivo e na perda de resistência. Mensurar e quantificar o papel da resistência do concreto nos danos causados à sua microestrutura pela ação das altas temperaturas.

2 Materiais e programa experimental

2.1 Programa experimental

O programa experimental consistiu na moldagem de corpos de prova cilíndricos, de dimensões 10 cm x 20 cm, de concretos de três traços, nomeados T1, T2 e T3, dosados a fim de se obter resistências médias aos 56 dias de 50, 70 e 100 MPa, respectivamente. Esses foram curados metade em câmara úmida, mantida à 23°C e 100% de umidade relativa, e a outra metade ao ar

livre. Para cada traço e cada tipo de cura, foram moldados corpos de prova de referência (ensaiados na temperatura ambiente) e outros corpos de prova que foram submetidos às temperaturas de 300°C e 600°C. Os resultados foram obtidos por meio do ensaio de resistência à compressão, velocidade de pulso ultrassônico, e também pela observação visual da ocorrência do spalling explosivo. Os corpos de prova também tiveram suas massas medidas antes e após a exposição às altas temperaturas. Foram concretados 18 corpos de prova de cada traço, totalizando 54 CPs, dos quais 36 foram submetidos à ação das altas temperaturas e 18 foram tomados como referência. Para cada traço, tipo de cura e temperatura analisada, foram moldados três corpos de prova, que foram ensaiados após 56 dias de cura.

2.1.1 Dosagem e concretagem

Todos os traços foram dosados com os mesmos agregados e adições, mudando apenas a relação água/aglomerantes e a quantidade de superplastificante. Foi utilizada sílica ativa como adição, a fim de se obter as altas resistências desejadas, especialmente para o traço T3, em uma quantidade fixada em aproximadamente 7,5% em massa de aglomerantes. O abatimento foi caracterizado por meio de Slump test, conforme procedimento da NBR NM 67 [8]. Devido às altas resistências trabalhadas, foi necessário o uso de aditivo superplastificante, a fim de se obter concretos com consistências satisfatórias e boa trabalhabilidade, mesmo com baixas relações água/aglomerantes. Os consumos de material por traço, bem como os abatimentos e as relações água/aglomerantes são apresentados na tabela 1. Os traços foram baseados no trabalho desenvolvido por (Dal Molin et al [9]). Foi realizado um ajuste no traço de 50 MPa, aqui denominado T1, a fim de se obter uma resistência mais próxima da desejada para o estudo.

Tabela 1 – Consumos de material, resistência esperada aos 56 dias e abatimento por traço

TRAÇO	T1	T2	T3
Resistência esperada aos 56 dias (Mpa)	50,00	70,00	100,00
água/aglomerantes	0,44	0,26	0,19
Abatimento (mm)	85,00	90,00	180,00
Consumo cimento (kg/m ³)	484,86	487,40	587,80
Consumo sílica ativa (kg/m ³)	38,58	42,30	46,60
Consumo agregado miúdo (kg/m ³)	760,73	661,98	613,43
Consumo agregado graúdo (kg/m ³)	1221,15	1191,69	1165,11
Consumo aditivo (kg/m ³)	-	3,01	8,86
Consumo água (kg/m ³)	230,21	135,85	120,01

Foi utilizado, para as concretagens, cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), aditivo superplastificante TEC-FLOW 8000, à base de éter carboxílico, agregado graúdo de pedra britada, de origem basáltica, com massa específica 2,9 g/cm³, dimensão máxima característica 38 mm e módulo de finura 7,06, areia média, de massa específica 2,63 g/cm³, dimensão máxima característica 2,4 mm e módulo de finura 2,14. As granulometrias dos agregados são mostradas nas tabelas 3 e 4. A sílica ativa utilizada foi do tipo não densificada, da fabricante ELKEM.

Tabela 2 – Granulometria do agregado graúdo

Peneira (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
2,4	4,51%	4,51%
1,2	13,72%	18,22%
0,6	4,47%	22,69%
0,3	54,43%	77,11%
0,15	14,42%	91,53%
<0,15	8,47%	100,00%

Tabela 3 – Granulometria do agregado miúdo

Peneira (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
38	0,00%	0,00%
19	7,41%	7,41%
9,5	91,28%	98,69%
4,8	1,31%	100,00%
<4,8	0,00%	100,00%

2.1.2 Queimas

Foram feitas quatro queimas, cada uma com 9 corpos de prova. Uma queima foi realizada com os cps curados ao ar na temperatura máxima de 300°C, a segunda com a mesma temperatura, porém com os corpos de prova saturados, a terceira com os corpos de prova curados ao ar na temperatura máxima de 600°C e, por fim, a quarta queima com os corpos de prova saturados nesta mesma temperatura, conforme mostra a Tabela 4.

Foi utilizado um forno elétrico programável da marca SANCHIS para aquecimento dos corpos de prova. A taxa de aquecimento utilizada foi de aproximadamente 50 °C/min., seguindo o procedimento proposto pela ISO 834-1 [10]. Cabe salientar que, por um erro de programação

no forno, a queima 4, dos corpos de prova curados em câmara úmida submetidos à 600 °C, teve uma taxa de aquecimento diferente das demais, nesse caso, a temperatura foi até 100 °C à mesma taxa anterior, porém ficou constante por aproximadamente 5 minutos, e então reiniciou o aquecimento até 600 °C à taxa de 50 °C/min.

Tentou-se manter os corpos de provas igualmente expostos às resistências do forno, porém, para que eventuais influências de uma possível exposição diferenciada fossem mitigadas nos resultados, os exemplares foram dispostos de forma aleatória dentro do forno, sem local definido para cada traço. Após atingir-se as temperaturas dos ensaios, essa foi mantida constante por um período de 120 min, para uniformização da temperatura no interior no corpo de prova, e então foram resfriados dentro do forno aberto, até o dia seguinte, quando foram realizados os ensaios de ultrassom, massa da amostra e ruptura por compressão.

Tabela 4 – Temperatura e tipo de cura de cada aquecimento dos CPs.

QUEIMA	Temperatura	Cura
1	300	ao ar
2	300	úmida
3	600	ao ar
4	600	úmida

2.1.3 Rupturas à compressão

A prensa utilizada para os ensaios de ruptura por compressão simples é da fabricante SHIMADZU, possui capacidade de carga de 2000 kN e resolução de 0,5 kN. A velocidade de carregamento utilizada foi de 0,45 MPa/s, conforme procedimento da NBR 5739 [11].

2.1.4 Velocidade de Pulso Ultrassônico

De acordo com (Malhotra e Carino [17]) o ensaio de VPU permite verificar microfissuração interna e deterioração no concreto, bem como estimar a resistência. Contudo, não deve ser utilizado como indicador geral da resistência à compressão, por sua dependência de múltiplos fatores (Neville [3]). Os ensaios de determinação dos tempos de propagação de onda foram feitos conforme recomendações da NBR 8802 [16], pelo método direto, com aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester), da marca C.N.S. ELECTRONICS, que possui resolução de 0,1 μ s. A velocidade de pulso ultrassônica (VPU) foi determinada através da relação entre a distância percorrida pelo pulso, igual à altura do corpo de

prova, e o tempo de propagação do pulso. As mensurações foram feitas imediatamente antes das rupturas à compressão, nos CPs de referência e nos expostos às altas temperaturas.

2.1.5 Pesagens

As pesagens foram feitas imediatamente antes da exposição às altas temperaturas e no dia seguinte, imediatamente antes dos ensaios de VPU e ruptura à compressão, com o uso de balança eletrônica, com resolução de 0,1 g.

3 Resultados e discussões

Este item apresenta os resultados observados e medidos nos ensaios, bem como uma discussão acerca dos valores obtidos.

3.1 Avaliação visual sobre a ocorrência do spalling explosivo

A tabela 5 apresenta um panorama do dano visível causado pelas altas temperaturas, que também pode ser visto nas figura 1 e 2.

Tabela 5 – Panorama de danos analisados por inspeção visual

Cura	Traço	300 °C			600 °C	
Cura úmida	T1	■	■	■	■	■
	T2	■	■	■	■	■
	T3	■	■	■	■	■
Cura ao ar	T1	■	■	■	■	■
	T2	■	■	■	■	■
	T3	■	■	■	■	■
Legenda	■	Falha apenas por compressão simples, nenhum deslocamento visível				
	■	Falha total por spalling explosivo				
	■	Lascamento superficial, sem falha				



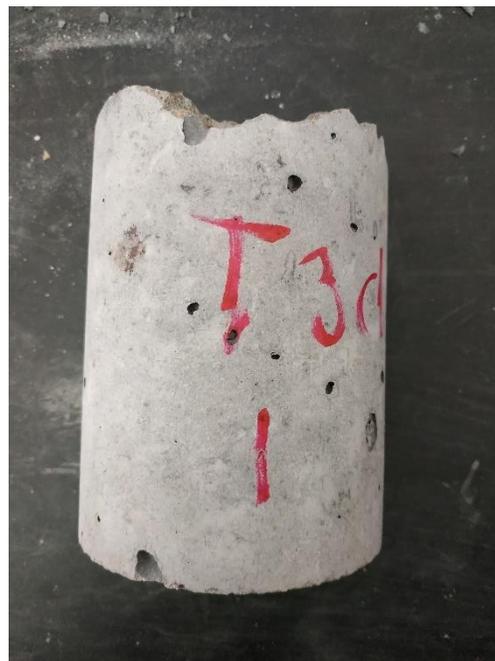
(a)



(b)



(c)

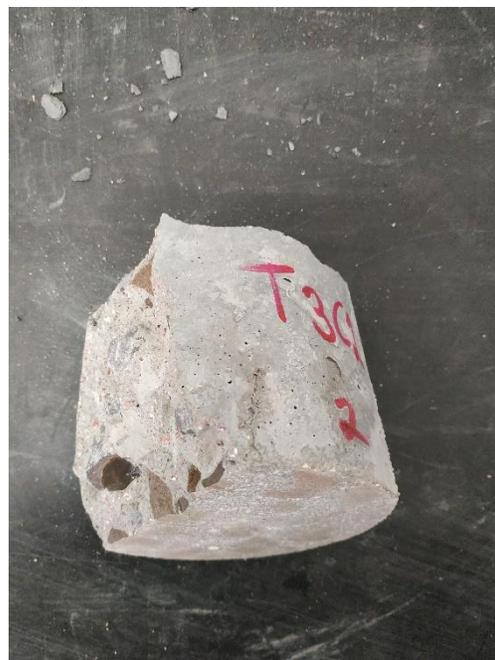


(d)

Figura 1. Imagem do interior do forno, com fragmentos de CPs falhados por spalling, após queima 3 (600 °C e cura ao ar) (a) e queima 4 (600°C e cura úmida) (b). Fissura e deslocamento em CP do traço T3 após queima 1 (c). Fragmento de CP do traço T3, após queima 3 (d).



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 2. Desplacimento causado em CP do traço T1, após queima 4 (e). Fragmentos de CP do traço T3 após queima 3 (f). CPs dos traços T1 e T2, após queima 2 (300 °C e cura úmida) (g) e (h).

Pelo exposto na tabela 5 e figuras 1 e 2 é perceptível que os corpos de prova do traço T3 foram mais avariados, em todas as situações, sendo que, para temperaturas de 600°C, metade desses falharam por spalling explosivo, dentro do esperado pela comparação com dados de outros estudos [4, 5, 6 e 7].

Nota-se também que as peças curadas em câmara úmida apresentaram muito mais lascamentos, embora a quantidade de falhas totais por spalling explosivo tenha sido igual para os dois tipos de cura. Esse resultado é congruente com o exposto por (Purkiss [4]).

Ainda, os traços T1 foram muito menos avariados, no que se pôde perceber por inspeção visual. Novamente, era um resultado esperado, dado que concretos com maior relação a/agl tendem a possuir maior permeabilidade [3], mitigando o desenvolvimento da poropressão que seria causado pelo confinamento de vapor d'água [5, 6 e 7].

3.2 Resistência à compressão

A tabela 6 apresenta a média e o desvio padrão (quando possível o seu cálculo) dos resultados de resistência à compressão para todas as variáveis analisadas nesta pesquisa. Devido à grande disparidade em relação à média inicial, a resistência do CP1 do traço T1 de referência curado ao ar foi descartada para as análises e a média recalculada, resultado apresentado na última coluna da tabela.

Tabela 6: Resultados de resistência à compressão

CURA	TRAÇO	TEMPERATURA	Tensão (MPa)					
			CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO	MÉDIA RECALCULADA
ÚMIDA	T1	REFERÊNCIA	46,88	53,99	49,78	50,22	2,92	50,22
		300 °C	41,21	38,05	45,22	41,49	2,93	41,49
		600 °C	33,08	32,43	33,03	32,85	0,30	32,85
	T2	REFERÊNCIA	78,53	75,72	73,18	75,81	2,19	75,81
		300 °C	64,88	72,38	78,65	71,97	5,63	71,97
		600 °C	61,10	**	58,91	60,01	1,10	60,01
	T3	REFERÊNCIA	105,91	111,92	98,12	105,32	5,65	105,32
		300 °C	92,55	97,54	94,06	94,72	2,09	94,72
		600 °C	**	76,63	77,03	76,83	0,20	76,83
AO AR	T1	REFERÊNCIA	33,18*	48,67	46,24	42,70	6,80	47,46
		300 °C	40,31	44,10	44,61	43,01	1,92	43,01
		600 °C	25,93	28,28	23,97	26,06	1,76	26,06
	T2	REFERÊNCIA	98,30	91,02	100,57	96,63	4,07	96,63
		300 °C	93,90	92,39	89,94	92,08	1,63	92,08
		600 °C	57,12	62,94	48,13	56,06	6,09	56,06
	T3	REFERÊNCIA	109,81	118,72	97,31	108,61	8,78	108,61
		300 °C	93,59	98,85	112,49	101,64	7,96	101,64
		600 °C	74,88	**	**	74,88	0,00	74,88
* Valor descartado para as análises								
** Falha por spalling								

Para uma primeira análise, apresenta-se, nas figuras 3 e 4, os resultados em resistência média à compressão, para cada traço, em função da temperatura.

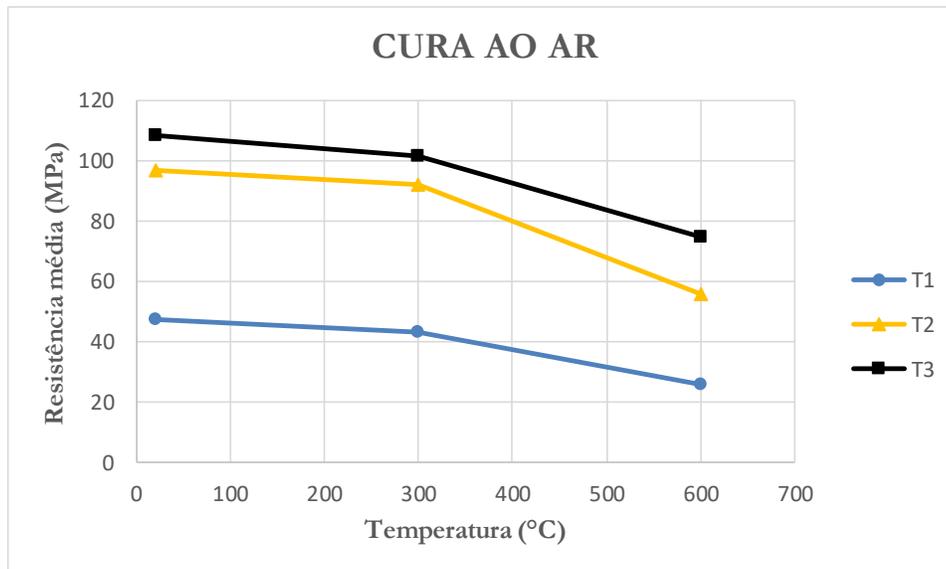


Figura 3. Curvas de resistência média à compressão em função da temperatura para cura ao ar.

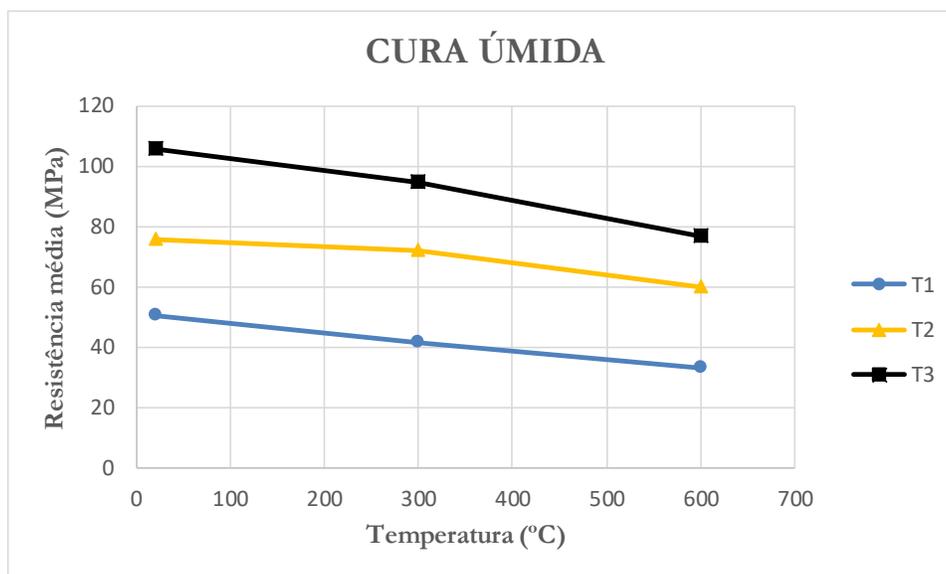


Figura 4. Curvas de resistência média à compressão em função da temperatura para cura úmida.

A análise das figuras 3 e 4 isoladamente pode conduzir a erros de interpretação, visto que esta pode mostrar as diferenças entre resistências de referência e residual, porém em termos absolutos. Para se melhor poder analisar em termos relativos, é apresentada a figura 5 na qual, agora, é mostrada a perda de resistência relativa em função da resistência inicial do mesmo traço, para ambas as curas.

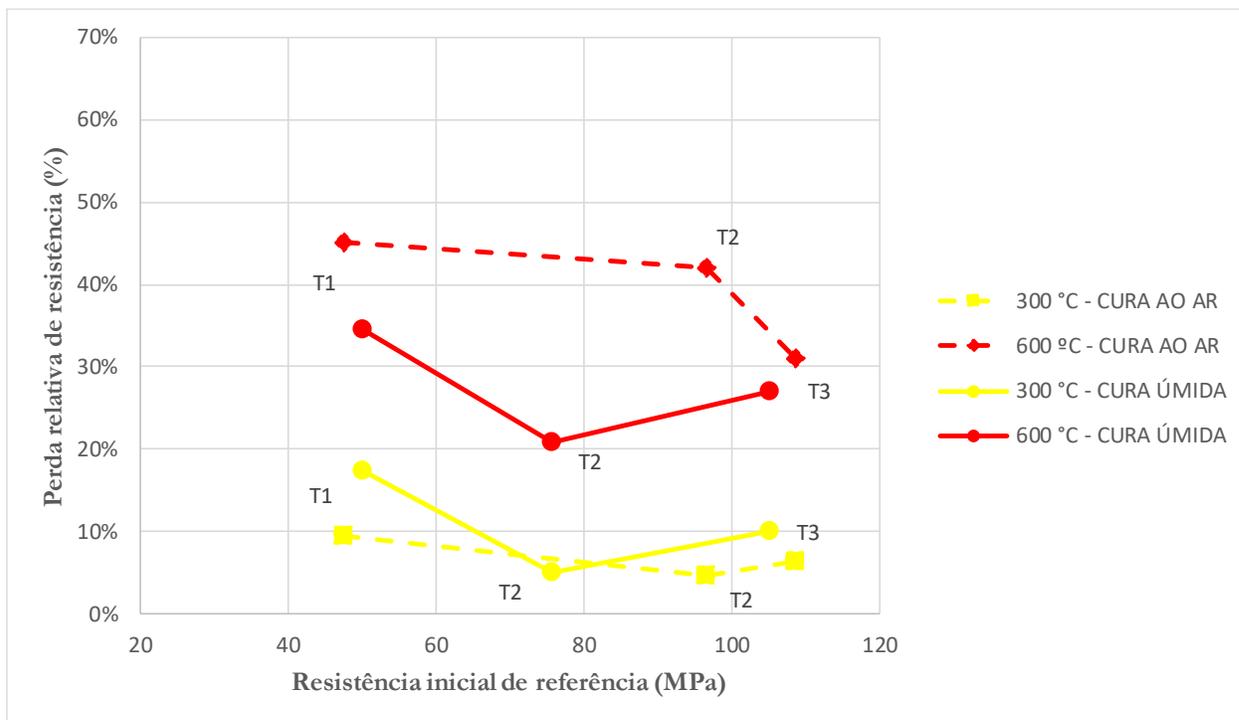


Figura 5. Perda relativa de resistência (%) em função da resistência de referência para o mesmo traço, para ambas as curas.

A análise da figura 5 revela um padrão: os concretos do traço T2 apresentaram o melhor comportamento em relação à perda relativa de resistência, para todos os casos, com excessão dos ensaiados na queima 3 (cura ao ar e queima à 600 °C). Cabe, no entanto, ressaltar, que a média da resistência residual, bem como as perdas, foram calculadas apenas para os elementos não falhados por spalling explosivo. Também pode-se perceber que ocorre uma inversão de comportamento, a saber, para a menor temperatura ensaiada, de 300°C, a cura ao ar ofereceu menor perda de resistência relativa, já para a temperatura de 600°C ocorreu o contrário. Tal resultado é coerente com o apontado por (Neville [3]).

3.3 Velocidade do pulso ultrassônico (VPU)

A tabela 7 apresenta os resultados em VPU para todas as variáveis analisadas.

Tabela 7 – Resultados de VPU

CURA	TRAÇO	TEMPERATURA	VPU (m/s)				
			CP 1	CP 2	CP 3	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO
ÚMIDA	T1	REFERÊNCIA	4952	4888	4924	4922	26
		300 °C	4301	4230	4414	4315	76
		600 °C	2174	2156	2316	2215	72
	T2	REFERÊNCIA	5218	5205	5318	5247	50
		300 °C	4844	4878	4925	4882	33
		600 °C	2770	**	2946	2858	88
	T3	REFERÊNCIA	5205	5273	5108	5195	68
		300 °C	4916	4923	4850	4896	33
		600 °C	**	2638	2924	2781	143
AO AR	T1	REFERÊNCIA	4871	4879	4919	4890	21
		300 °C	4264	4277	4262	4268	7
		600 °C	2012	1822	1899	1911	78
	T2	REFERÊNCIA	5229	5144	5200	5191	35
		300 °C	4869	4935	4870	4892	31
		600 °C	2595	2564	2489	2550	45
	T3	REFERÊNCIA	5224	5198	5256	5226	24
		300 °C	5003	5020	4911	4978	48
		600 °C	2591	**	**	2591	0
** Falha por spalling							

As figuras 6 e 7 apresentam os resultados em velocidade do pulso ultrassônico, em m/s, em função das resistências do concreto, para as diferentes temperaturas de ensaio, para cura ao ar e úmida, respectivamente.

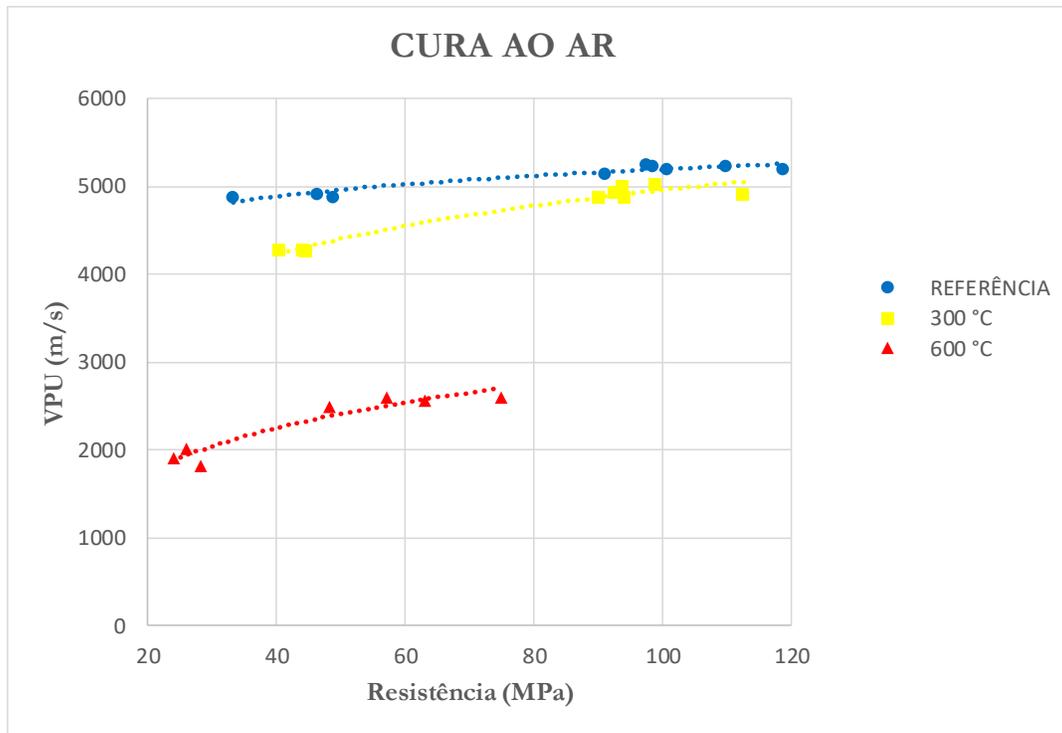


Figura 6. VPU em função da resistência, cura ao ar.

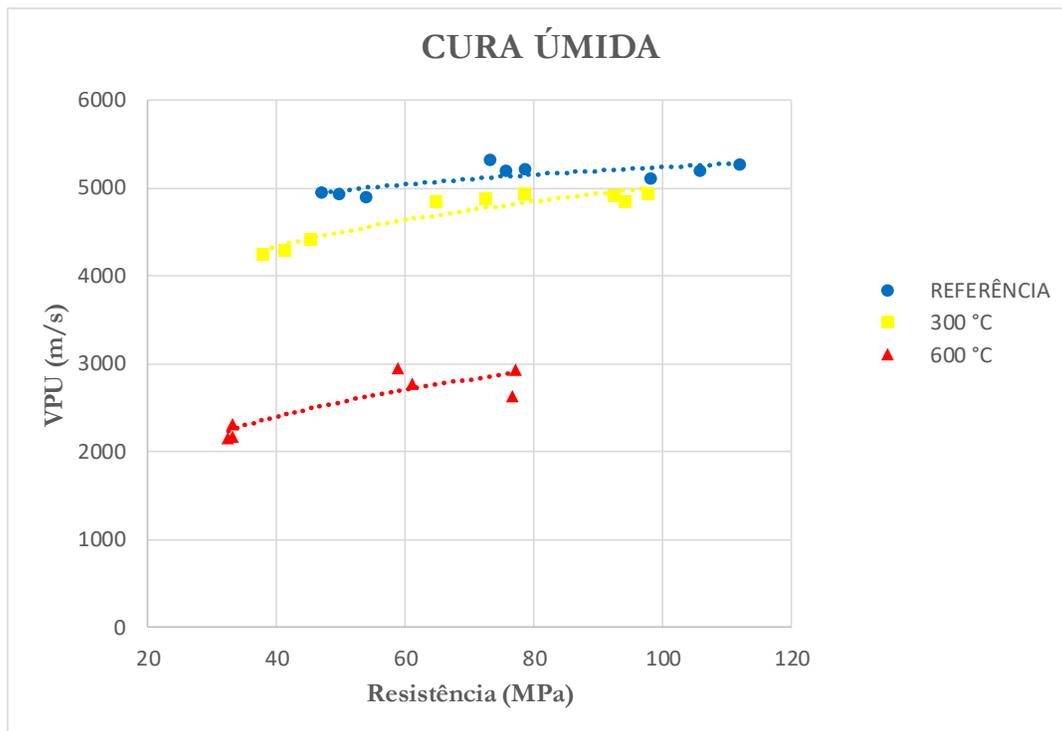


Figura 7. VPU em função da resistência, cura úmida.

Na figura 8 são apresentadas as variações da VPU em função da resistência de referência inicial, calculada pelas médias de cada traço.

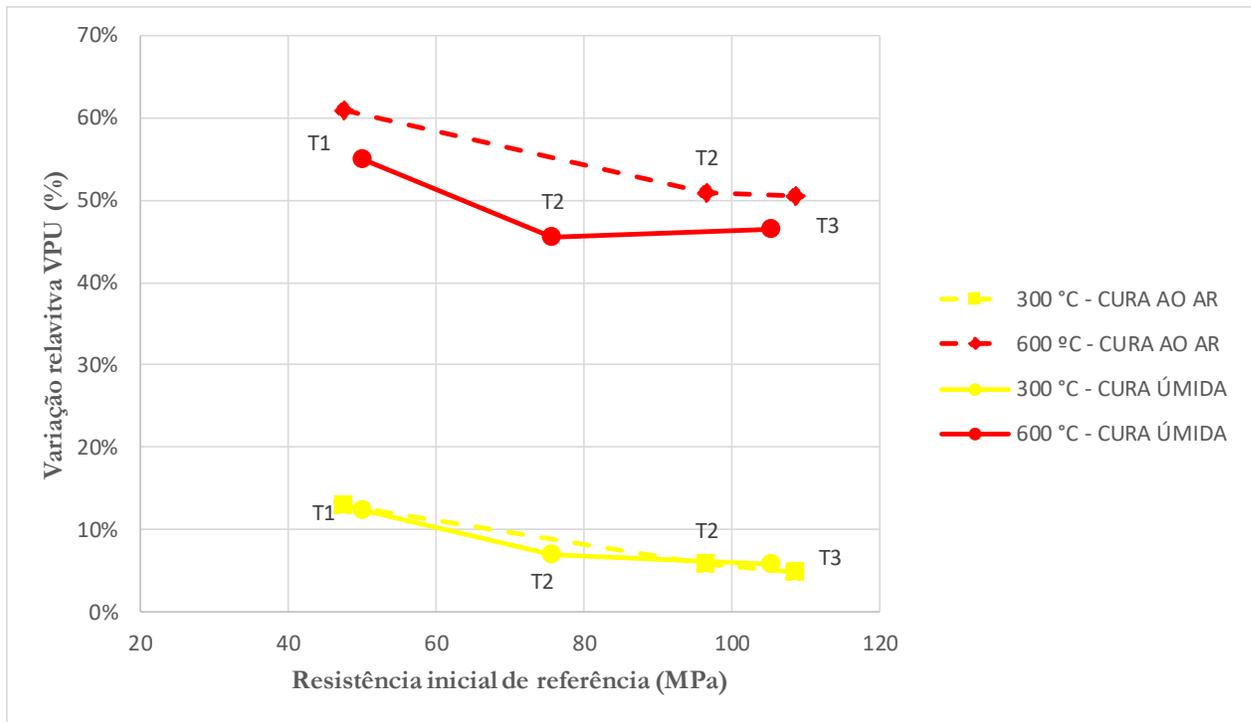


Figura 8. Variação na VPU média para cada traço em função da resistência inicial de referência.

Da figura 8, percebe-se que, para ambos os tipos de cura, a velocidade de pulso ultrassônico decaiu entre 50% e 60% em todos os traços, no ensaio à 600 °C, contudo, para 300° C, variou apenas aproximadamente 10%. Com relação ao traço T1, o traço T2 apresentou aproximadamente 50 % da redução da VPU, à 300 °C, e 80 % à 600 °C.

A análise da figura 8 indica que os CPs do traço T2 sofreram dano semelhante ao do traço T3, à temperatura de 600 °C, contudo, à menores temperaturas, o traço T3 ofereceu melhor resultados.

Os resultados apresentados na figura 8 são condizentes com os mostrados no item 3.2 e com o concluído por (Almeida [14]), indicando que as microfissurações no concreto, mensuradas pela VPU, vêm já à menores temperaturas e em maior intensidade que as variações na resistência residual, sendo essas mais acentuadas à 600 °C.

3.4 Perda de massa

A tabela 8 apresenta os resultados em massas inicial e residual para todas as variáveis analisadas.

Tabela 8 – Resultados de massas inicial e residual

CURA	TRAÇO	TEMPERATURA	MASSA (g)							
			CP 1		CP 2		CP 3		MÉDIA	
			I. *	R. ***	I. *	R. ***	I. *	R. ***	I. *	R. ***
ÚMIDA	T1	300 °C	3797,0	3670,3	3814,0	3675,7	3816,5	3693,5	3809,2	3679,8
		600 °C	3782,3	3481,0	3840,8	3548,5	3825,2	3533,9	3816,1	3521,1
	T2	300 °C	3961,5	3901,1	3965,5	3900,7	3969,0	3906,7	3965,3	3902,8
		600 °C	3914,4	3693,0	3914,7	**	3970,4	3742,0	3933,2	3717,5
	T3	300 °C	3915,5	3858,5	3945,0	3877,3	4003,0	3945,7	3954,5	3893,8
		600 °C	3936,9	**	4029,0	3813,5	3964,2	3759,0	3976,7	3786,3
AO AR	T1	300 °C	3762,4	3603,7	3811,8	3665,0	3827,0	3676,0	3800,4	3648,2
		600 °C	3793,1	3527,5	3890,5	3621,5	3774,3	3507,6	3819,3	3552,2
	T2	300 °C	3887,3	3817,7	3931,6	3862,4	3908,0	3837,2	3909,0	3839,1
		600 °C	3893,2	3683,3	3880,7	3677,3	3929,6	3699,5	3901,2	3686,7
	T3	300 °C	3995,8	3931,7	3963,7	3903,6	3930,6	3858,5	3963,4	3897,9
		600 °C	3970,5	3760,0	3966,6	**	3946,4	**	3961,2	3760,0
* I.: Inicial										
** Falha por spalling										
*** R.: Residual										

Na figura 9 são mostradas as perdas de massa relativas, para ambas as curas, em função da resistência, para o mesmo CP. Os corpos de prova falhados por spalling explosivo não foram considerados nestas análises.

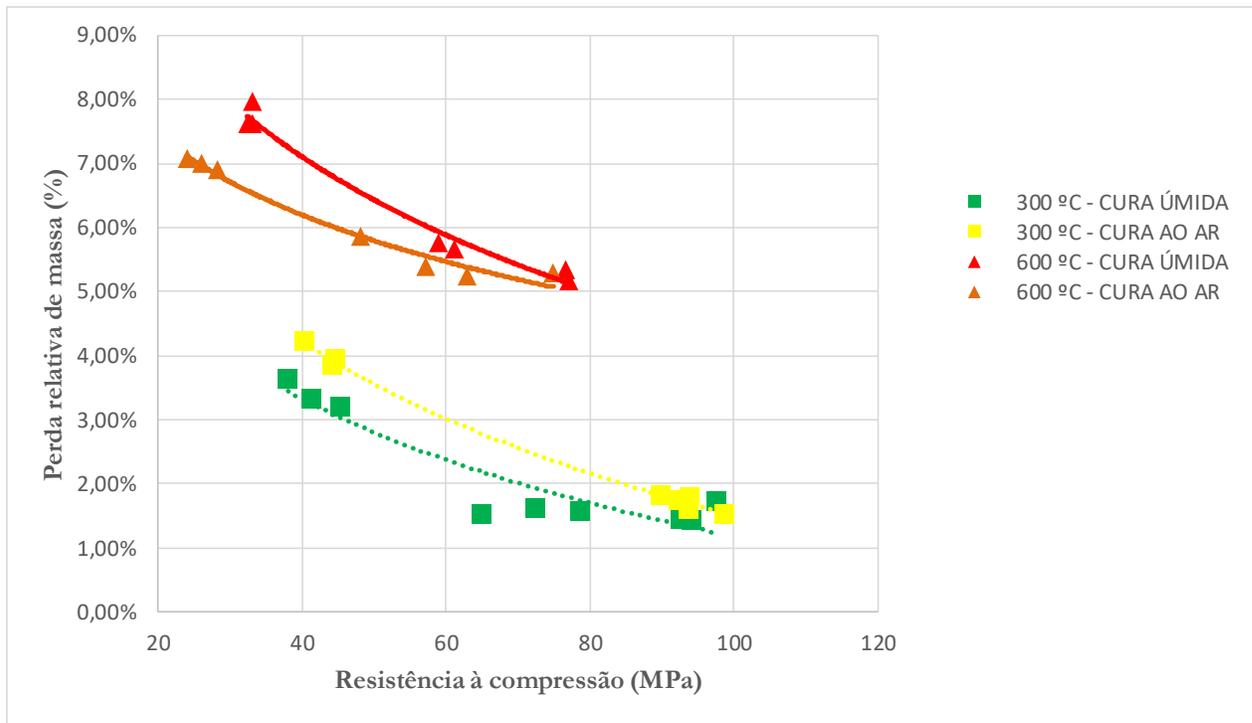


Figura 9. Perda de massa relativa (%) em função da resistência do mesmo corpo de prova, ambas as curas.

Cabe salientar que esses resultados são, em maior parte, devidos somente à evaporação de água do concreto, não sendo, assim, uma medida proporcional ao spalling ocorrido, mas ao utilizados em conjunto com os dados da inspeção visual, mostrada no item 3.1, podem ser um bom demonstrativo de comportamento dos traços estudados.

Nos ensaios à 300 °C foram observados bem mais lascamentos nos corpos de prova curados em câmara úmida em relação aos curados ao ar, conforme exposto na tabela 4 do item 3.1, portanto, nesse caso, a diferença entre perdas de massa para ambas as curas se deveu mais pela perda de material sólido. Nos ensaios à 600 °C, para cura úmida e cura ao ar, houve número semelhante de espécimes com deslocamentos então, nesse caso, a diferença nas perdas de massa parece ter sido causada predominantemente pela evaporação de água.

3.5 Normatização

As normas ABNT NBR 15200 – “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio” [12], em sua figura 1, e EUROCODE 2 PART. 1-2. [13], em sua figura 4.1, apresentam curvas com fatores de redução da resistência ($k_{c,\theta}$) em função da temperatura à qual o concreto foi submetido, válida para concretos de agregados silicosos, resistência entre 20 e 50 MPa e com peso específico na faixa de 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³. O EUROCODE 2 PART. 1-2 [13] apresenta também, em sua tabela 6.1N, coeficientes para concretos de alta resistência, para as classes I (C55 e C60) II (C70 E C80) e III (C90). Na figura 10 são apresentadas essas curvas, juntamente com os valores obtidos pelos ensaios feitos nesse trabalho.

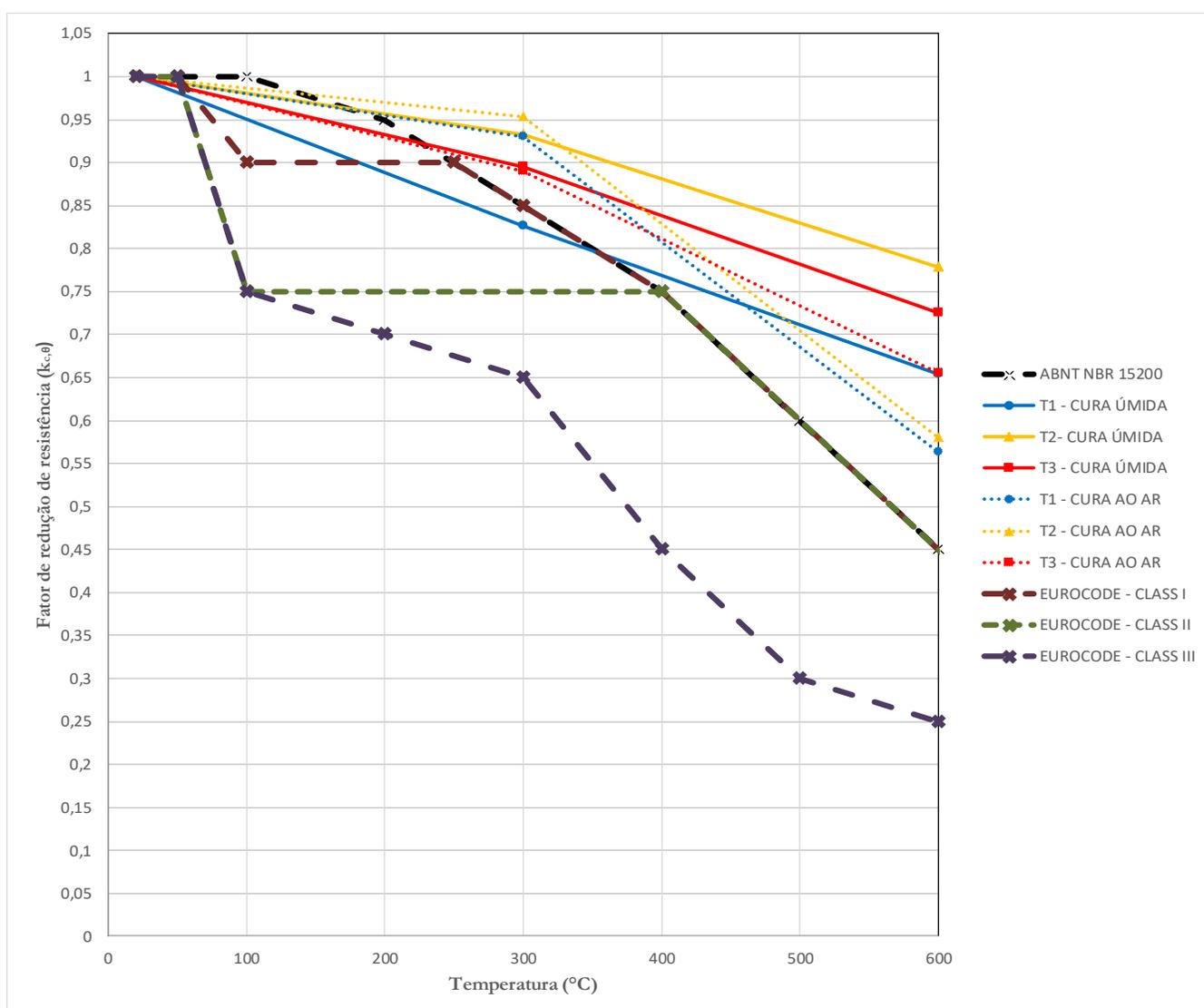


Figura 10. Fatores de redução resistência ($k_{c,\theta}$) obtidos nos ensaios desta pesquisa em comparação com os dados nas normas NBR 15200 [12] e EUROCODE 2: PART. 1-2 [13]

Nota-se que, para todas as variáveis, os coeficientes dados pelos códigos [12 e 13] se mostraram conservadores em relação aos obtidos nos ensaios, chegando ao extremo de, para o traço T3, o valor oferecido por [13] ser um terço do obtido nos ensaios dessa pesquisa, com exceção do traço T1 curado em câmara úmida, que resultou aproximadamente 3% maior do que o recomendado para sua classe de resistência. Uma possível causa para tal discrepância é a aplicação de diferentes taxas de aquecimento nos ensaios utilizados como base pela NBR 15200 [12] e pelo EUROCODE 2: PART. 1-2 [13], bem como diferentes tempos de exposição.

No entanto, cabe ressaltar que [12] não propõe nenhuma consideração quanto à possibilidade de ocorrência de spalling, ainda que, como mostrado na tabela 4, para 600 °C, grande parte dos corpos de prova tenham falhado por esse motivo (mesmo na cura ao ar), cenário que, em situação de incêndio real, poderia ter sido catastrófico.

4 Conclusões

Pelas limitações dessa pesquisa, desde a quantidade de amostras por ensaio, até falhas na execução desses, as conclusões aqui apontadas não devem ser generalizadas. Com a devida cautela, os resultados obtidos aqui apontaram que:

- Concretos de resistências mais altas, da ordem de 100 MPa, se mostraram mais suscetíveis à falha por spalling explosivo.
- Em resistências menores, próximas de 50 MPa, nas temperaturas ensaiadas, a probabilidade de ocorrência do spalling é bem reduzida.
- Concretos com resistência intermediária dentre os ensaiados, da ordem de 75 MPa, curados ao ar, apresentaram, de forma geral, o melhor comportamento em se tratando de perda relativa de resistência e suscetibilidade à falha por spalling explosivo.
- A incidência de lascamentos é maior em concretos saturados, corroborando a hipótese de que causa importante para sua ocorrência é o desenvolvimento de poropressão no interior do concreto.
- De forma geral, temperaturas de 300 °C causaram pequenas alterações nas propriedades do concreto.

- Os concretos que perderam mais massa de água, em geral, sofreram menos lascamentos superficiais, indicando novamente a hipótese de que os concretos menos permeáveis desenvolvem maior poropressão à altas temperaturas, o que causa a explosão.
- A NBR 15200 [12] e o EUROCODE 2 PART 1-2 [13] se mostraram conservadores na consideração da resistência à compressão residual.

5 Agradecimentos

Agradeço, primeiramente à professora Ângela Graeff, pelas orientações, pela disponibilidade em ensinar, pelo conhecimento transmitido durante o desenvolvimento desse trabalho, sem os quais ele não seria possível.

Ao bolsista Ronaldo, pelo auxílio constante e imprescindível com as práticas laboratoriais. Ao bolsista Victor, pela importante ajuda na etapa final dos ensaios.

Aos técnicos do LEME, Edgar e Fontes, pelos serviços e pela condução dos ensaios.

Ao LEME, pelo fornecimento dos materiais utilizados nessa pesquisa.

6 Referências bibliográficas

- [1] – AÏTCIN, P. C. **High-performance concrete**. Routledge: Londres, 1998
- [2] – NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Bookman: Porto Alegre, 2013.
- [3] – NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. Pitman Publishing. Londres, 1976.
- [4] – PURKISS, John A. **Fire safety engineering design of structures**. Butterworth Heinemann: Oxford, 1996.
- [5] – PHAN, L. T. **High-Strength Concrete at High Temperature – An Overview**. p. 15, [s.d.].
- [6] – PHAN, L. T. **Pore pressure and explosive spalling in concrete**. *Materials and Structures*, v. 41, n. 10, p. 1623–1632, dez. 2008.
- [7] – KODUR, V.; MCGRATH, R. **Fire Endurance of High Strength Concrete Columns**. p. 15, 2003.
- [8] – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- [9] – DAL MOLIN, D. C.C. et al. **Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento**. [s.l: s.n.].
- [10] – INTERNACIONAL STANDARD. ISO 834 - Fire Resistance tests - Elements of building construction - Part 1: .
- [11] – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [12] – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Rio de Janeiro, 2012.

-
- [13] – EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire.** 2004.
- [14] – ALMEIDA, J. M. A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2017.
- [15] – KODUR, V.; DWAIKAT, M. **Fire-induced spalling in reinforced concrete beams.** Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, v. 165, n. 7, p. 347–359, jul. 2012.
- [16] – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019.
- [17] – MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. **Handbook on nondestructive testing of concrete.** 2ªEd: ASTM International, CRC Press LLC, USA, 2004.
- [18] – LIMA, R. C. A.. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005.
- [19] – BUCHANAN, A.H. **Structural design for fire safety.** Chichester: Jhon Wiley & Sons Ltda, 2001.