



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de concretos com altos teores de cinza volante em substituição ao cimento Portland. Foi utilizado um planejamento fatorial e análise ANOVA para encontrar a equação de regressão. Propriedades dos concretos no estado fresco e no estado endurecido foram medidos.

Caracterizações microestruturais e térmicas foram realizadas para verificar o efeito da adição de cinza volante na microestrutura e propriedades do concreto. E realizou-se simulação numérica através do programa Abaqus para entender sobre as trocas de calor existentes durante o processo de hidratação do cimento. A cinza volante apresentou características que possibilitam seu uso como material pozolânico. A análise ANOVA se mostrou adequada com valores de R^2 aceitáveis. O modelo de regressão proposto foi validado. O concreto com alto teor de cinza volante, 60% em substituição ao cimento Portland, apresentou valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade que ratificam seu uso como concreto estrutural.

Orientadora: Dra. Carmeane Effting

Joinville, 2018

ANO
2018

DÉCIO MARCON NETO | DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESEMPENHO DE CONCRETOS
COM ALTOS TEORES DE CINZA
VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO AO
CIMENTO PORTLAND**

DÉCIO MARCON NETO

JOINVILLE, 2018

DÉCIO MARCON NETO

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ALTOS TEORES DE CINZA VOLANTE
EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Carmeane Effting.

JOINVILLE

2018

Marcon Neto, Décio

Desempenho de Concretos com Altos Teores de Cinza
Volante em Substituição ao Cimento Portland. / Décio Marcon
Neto. -- 2018.

130 p.

Orientadora: Carmeane Effting

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2018.

1. Concreto com cinza volante.
 2. Propriedades térmicas e
mecânicas.
 3. Microestrutura.
 4. Planejamento fatorial.
 5. Simulação numérica.
- I. Effting, Carmeane. II. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**Desempenho de Concretos com Altos Teores de Cinza Volante em
Substituição ao Cimento Portland**

por

Décio Marcon Neto

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Banca Examinadora:

Carmeane Effing
Profa. Dra. Carmeane Effing
CCT/UDESC (Orientadora/Presidente)

Wellington Longuini Repette
Prof. Dr. Wellington Longuini Repette
UFSC

Itamar Ribeiro Gomes
Prof. Dr. Itamar Ribeiro Gomes
CCT/UDESC

Marilena Valadares Folgueras
Profa. Dra. Marilena Valadares
Folgueras - CCT/UDESC

Joinville, SC, 06 de dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Andressa, pelo companheirismo, apoio, ajuda e paciência ao longo destes anos, com certeza sem ela não seria possível a realização desta pesquisa.

À minha orientadora Prof. Dra. Carmeane Effting pela confiança no meu trabalho e a dedicação prestada ao longo de todo mestrado, foram suas sugestões e orientações que guiaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Dr. Adilson Schackow, responsável técnico pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC, onde foram executados a maioria dos experimentos desta pesquisa, por toda ajuda, paciência e troca de informações ao longo desses 3 anos de caminhada.

Ao Prof. Dr. Itamar Ribeiro Gomes, por dispor de seu tempo e compartilhar seus conhecimentos na elaboração deste trabalho.

Aos professores Dra. Marilena Valadares Folgueras e o professor da UFSC, Dr. Wellington Longuini Repette, por aceitarem o convite para participar da banca examinadora da apresentação desta dissertação.

Ao colega de mestrado, e amigo, Gustavo, pela grande colaboração e troca de informações, sobretudo no auxílio com o Abaqus. Assim como a colega Betina Gonçalves pela ajuda com a simulação numérica.

À todos os professores que passaram pela minha formação, meu sincero agradecimento pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos.

E à todos os colegas do curso que de alguma forma contribuíram ao longo desta jornada.

À todos, meu muito obrigado.

RESUMO

A utilização de rejeitos em substituição ao cimento Portland na produção de concretos, ajuda a reduzir a emissão de gás carbônico para a atmosfera, além de dar destino a subprodutos industriais que normalmente, são tratados como simples rejeitos. O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de concretos com altos teores de cinza volante em substituição ao cimento Portland CPV. Utilizou-se a técnica de planejamento fatorial, com variação de dois fatores, porcentagem de cinza volante e relação água/cimento, e três níveis para cada fator. Foram elaboradas nove misturas de concreto, assim como nove réplicas, para realizar a análise ANOVA e encontrar a equação de regressão. A cinza volante foi caracterizada para avaliar seu potencial quanto à pozolanicidade. Propriedades dos concretos no estado fresco (consistência, manutenção da trabalhabilidade e calor de hidratação) e no estado endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade, condutividade térmica, índice de vazios, absorção de água e densidade) foram medidos. Caracterizações microestruturais e térmicas usando MEV/EDS e TGA/DTG foram realizadas para verificar o efeito da adição de cinza volante na microestrutura e propriedades do concreto. E realizou-se simulação numérica através do programa Abaqus para entender sobre as trocas de calor existentes durante o processo de hidratação do cimento. A cinza volante apresentou características que possibilitam seu uso como material pozolânico, mas sua reatividade é maior após moagem. A análise estatística ANOVA se mostrou adequada com valores de R^2 aceitáveis. O modelo de regressão proposto foi validado, através da mistura intermediária V1. O concreto V1 com alto teor de cinza volante, 60% em substituição ao cimento Portland, apresentou valores de resistência mecânica ($33,38 \pm 3,99$ MPa) e módulo de elasticidade ($38,58 \pm 0,81$ GPa) que ratifica seu uso como concreto estrutural. Além disso, o concreto V1 apresentou baixo calor de hidratação, redução de 23% em relação ao concreto padrão VP (sem adição de cinza volante), além de apresentar baixa variação de temperatura durante o processo de hidratação e cura. A caracterização microestrutural evidenciou que o concreto V1 apresentou um menor nível de fissuração quando comparado ao concreto padrão VP, consequência da utilização de altos teores de cinza volante em sua produção.

Palavras-chave: Concreto com cinza volante. Propriedades térmicas e mecânicas. Microestrutura. Planejamento fatorial. Simulação numérica.

ABSTRACT

The use of reject, instead of Portland cement, in the production of concrete helps to reduce the emission of carbon dioxide into the atmosphere, as well as to target industrial by-products that are normally treated as simple rejects. The present work had as objective, the development of concrete with high levels of fly ash replacing Portland cement CPV. The factorial planning technique was used, with two factors variation, fly ash percentage and water / cement ratio, and three levels for each factor. Nine concrete mixtures were prepared, as well as nine replicates, to perform the ANOVA analysis and to find the regression equation. The fly ash was characterized to evaluate their potential as a pozzolana. The properties of the concretes in the fresh state (consistency, maintenance of the workability and heat of hydration) and in the hardened state (compressive strength, modulus of elasticity, conductivity, voids index, water absorption and density) were measured. Microstructural and thermal characterization using MEV / EDS and TGA / DTG were performed to verify the effect of fly ash addition on the microstructure and concrete properties. Numerical simulation was performed using the Abaqus software to understand the heat exchanges during the cement hydration process. The fly ash showed characteristics that allow its use as pozzolanic material, but its reactivity is greater after processing (milling). Statistical analysis ANOVA was adequate with acceptable R^2 values. The proposed regression model was validated through the intermediate mixture V1. The V1 concrete containing high fly ash, 60% as a replacement for Portland cement, presented values of mechanical strength (33.38 ± 3.99 MPa) and modulus of elasticity (38.58 ± 0.81 GPa), which confirms its use as structural concrete. In addition, the V1 concrete showed low heat of hydration, a reduction of 23% in relation to the standard concrete VP (without addition of fly ash), besides presenting low temperature variation during the hydration and curing process. The microstructural characterization showed that the V1 concrete had a lower level of cracking when compared to the standard VP concrete, as a consequence of the use of high fly ash content in its production.

Keywords: Concrete with fly ash. Thermal and mechanical properties. Microstructure. Factorial planning. Numerical simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relação entre a temperatura global e a concentração de CO ₂ na atmosfera.....	17
Figura 2 - Micrografia de cinza volante. Magnificação: (a) 5.000x, (b) 10.000x.....	20
Figura 3 - (a) zona de transição pasta/agregado de um concreto convencional, (b) zona de transição pasta/agregado de um concreto com adição mineral.....	25
Figura 4 - Lançamento e acabamento do concreto com alto teor de cinza volante.....	28
Figura 5 - Micrografia da interface pasta / agregado sem zona de transição.....	29
Figura 6 - Micrografia da zona de transição pasta / agregado com microfissura.....	29
Figura 7 - Variação de temperatura ΔT	31
Figura 8 - Fluxograma do projeto experimental.....	37
Figura 9 - Materiais utilizados na elaboração dos traços: (a) agregado graúdo; (b) cimento e cinza volante; (c) agregado miúdo; (d) água.....	38
Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	39
Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	40
Figura 12 - Cinza volante utilizada nos ensaios.....	40
Figura 13 - Ensaio de consistência (<i>slump test</i>) da mistura teste do traço 3.....	49
Figura 14 - Ensaio de consistência (<i>slump test</i>) da mistura teste do traço 7.....	50
Figura 15 - Moldagem dos corpos de prova.....	51
Figura 16 - Tanque de cura dos corpos de prova.....	52
Figura 17 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>).....	53
Figura 18 - Gráfico padrão gerado num calorímetro.....	54
Figura 19 - Prensa EMIC utilizada nos rompimentos dos corpos de prova.....	55
Figura 20 - Corpo de prova com <i>strain gauge</i> instalado e pronto para ensaio.....	56
Figura 21 - PMX e caixa para conexão do <i>strain gauge</i>	56
Figura 22 - Transdutor de força.....	57
Figura 23 - Equipamento Q50.....	59
Figura 24 - Amostras embutidas em resina epóxi e polidas.....	60
Figura 25 - Equipamento utilizado para revestimento das amostras.....	61
Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado no ensaio.....	62
Figura 27 - Ensaio de condutividade térmica.....	63
Figura 28 - Arranjo experimental para a medição da condutividade térmica.....	63
Figura 29 - Corpo de prova cilíndrico com termopar posicionado.....	65
Figura 30 - Ordenação de nós e numeração de faces do elemento finito.....	67
Figura 31 - Malha de elementos finitos do corpo de prova (Abaqus).....	68
Figura 32 - Distribuição granulométrica das partículas de cinza volante comum.....	72
Figura 33 - Distribuição granulométrica das partículas de cinza volante moída.....	72
Figura 34 - Resultado do ensaio do índice de desempenho com cimento Portland.....	73
Figura 35 - Gráfico da temperatura ao longo do processo de cura do concreto.....	76
Figura 36 - Resultados do ensaio DTG.....	78
Figura 37 - Resultados do ensaio TGA.....	79
Figura 38 - Ensaio de resistência à compressão.....	80
Figura 39 - Diagrama de Pareto para 28 dias.....	84
Figura 40 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.....	85
Figura 41 - Gráfico de contorno da RC28 em função dos fatores %CV e fator a/c.....	85
Figura 42 - Diagrama de Pareto para 115 dias.....	87
Figura 43 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.....	88
Figura 44 - Gráfico de contorno da RC115 em função dos fatores %CV e fator a/c..	89

Figura 45 - Diagrama de Pareto para o abatimento.....	91
Figura 46 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.....	92
Figura 47 - Gráfico de contorno do abatimento (<i>slump</i>) em função dos fatores %CV e fator a/c.....	93
Figura 48 - Gráfico da temperatura ao longo do processo de cura do concreto.....	95
Figura 49 - Gráfico do fluxo de calor total.....	96
Figura 50 - Ensaio de resistência à compressão.....	97
Figura 51 - Curva tensão-deformação CP1 da mistura V1.....	97
Figura 52 - Linha traçada de forma secante a curva σ - ϵ	98
Figura 53 - Resultados do ensaio DTG para amostras V1 e VP.....	101
Figura 54 - Resultados do ensaio TGA para amostras V1 e VP.....	102
Figura 55 - Gráfico comparativo entre temperaturas experimentais e simuladas.....	103
Figura 56 - Distribuição de temperaturas para VP durante aquecimento.....	104
Figura 57 - Distribuição de temperaturas para VP durante resfriamento.....	105
Figura 58 - Distribuição de temperaturas para V1 durante aquecimento.....	106
Figura 59 - Distribuição de temperaturas para V1 durante resfriamento.....	107
Figura 60 - Temperatura diferencial entre os pontos mais extremos de VP e V1.....	108
Figura 61 - Micrografias do concreto VP com 115 dias. Aumento 70x.....	110
Figura 62 - Micrografias do concreto VP com 115 dias. Aumento 70x.....	111
Figura 63 - Micrografias do concreto V1 com 115 dias. Aumento 70x.....	112
Figura 64 - Micrografias do concreto V1 com 115 dias. Aumento 70x.....	113
Figura 65 - Micrografia BSE do concreto VP com 115 dias. Aumento 350x.....	114
Figura 66 - Espectro EDS do local 1.....	115
Figura 67 - Espectro EDS do local 2.....	115
Figura 68 - Espectro EDS do local 3.....	116
Figura 69 - Espectro EDS do local 4.....	116
Figura 70 - Micrografia BSE do concreto V1 com 115 dias. Aumento 500x.....	117
Figura 71 - Espectro EDS do local 1.....	117
Figura 72 - Espectro EDS do local 2.....	118
Figura 73 - Micrografia da zona de transição do concreto VP (aumento 4000x).....	118
Figura 74 - Espectro EDS do local 1.....	119
Figura 75 - Espectro EDS do local 2.....	119
Figura 76 - Micrografia da zona de transição do concreto V1 (aumento 4000x).....	120
Figura 77 - Espectro EDS do local 1.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporção de mistura do concreto com alto teor de cinza volante.....	28
Tabela 2 - Tabela ANOVA para projeto fatorial com dois fatores.....	35
Tabela 3 - Quantidade de material, em massa, para teste de pozolanicidade.....	43
Tabela 4 - Quantidades em kg dos materiais utilizados.....	45
Tabela 5 - Valores estimados para teores de argamassa seca (α).....	47
Tabela 6 - Valores estimados de relações água/cimento.....	47
Tabela 7 - Traços unitários em massa.....	48
Tabela 8 - Traços do experimento fatorial para volume de 16 litros.....	49
Tabela 9 - Quantidade de material retido na peneira de malha 45 μm	70
Tabela 10 - Composição química da cinza volante.....	70
Tabela 11 - Massa específica das cinzas volantes.....	71
Tabela 12 - Leituras do abatimento ao longo do tempo, em mm.....	75
Tabela 13 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água.....	77
Tabela 14 - Valores médios para resistência à compressão RC28 e RC115 dias....	82
Tabela 15 - Valores do abatimento (<i>slump test</i>).....	82
Tabela 16 - Análise de variância da resistência à compressão com 28 dias de cura com os efeitos estatisticamente significativos.....	83
Tabela 17 - Teste para validação e valores preditos para RC28.....	86
Tabela 18 - Análise de variância da resistência à compressão com 115 dias de cura com os efeitos estatisticamente significativos.....	87
Tabela 19 - Teste para validação, medidas e valores preditos para RC115.....	90
Tabela 20 - Análise de variância para o abatimento (<i>slump</i>) com os efeitos estatisticamente significativos.....	90
Tabela 21 - Teste para validação, medidas e valores preditos para o abatimento....	93
Tabela 22 - Leitura do abatimento (<i>slump test</i>).....	94
Tabela 23 - Valores do módulo de elasticidade secante.....	98
Tabela 24 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água.....	99
Tabela 25 - Valores de condutividade térmica.....	99
Tabela 26 - Valores dos coeficientes de transmissão superficial de calor.....	100
Tabela 27 - Análise química local 1.....	115
Tabela 28 - Análise química local 2.....	115
Tabela 29 - Análise química local 3.....	116
Tabela 30 - Análise química local 4.....	116
Tabela 31 - Análise química local 1.....	117
Tabela 32 - Análise química local 2.....	118
Tabela 33 - Análise química local 1.....	119
Tabela 34 - Análise química local 2.....	119
Tabela 35 - Análise química local 1.....	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	AQUECIMENTO GLOBAL.....	16
2.2	IMPACTO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA MUNDIAL DO CONCRETO	17
2.3	CINZA VOLANTE	19
2.4	EFEITO QUÍMICO DO CIMENTO E DA CINZA VOLANTE.....	22
2.4.1	Carbonatação.....	26
2.5	CONCRETOS COM ALTO TEOR DE CINZA VOLANTE	27
2.6	PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO	30
2.6.1	Calor específico	31
2.6.2	Condutividade térmica	32
2.7	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	32
2.8	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	35
2.8.1	Método dos elementos finitos (MEF)	35
2.8.2	Programa Computacional Abaqus	36
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	38
3.1.1	Cimento Portland.....	38
3.1.2	Agregado graúdo	39
3.1.3	Agregado miúdo	39
3.1.4	Cinza volante.....	40
3.1.5	Aditivo plastificante.....	41
3.1.6	Água.....	41
3.1.7	Ordem de mistura dos materiais	41
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA CINZA VOLANTE	41
3.2.1	Propriedades físicas.....	42
3.2.2	Determinação do índice de atividade pozolânica	42
3.2.3	Análise de fluorescência de raios X.....	43
3.2.4	Massa específica da cinza volante	43

3.2.5 Determinação da distribuição granulométrica	44
3.3 COMPARATIVO ENTRE CINZA VOLANTE COMUM E CINZA VOLANTE MOÍDA	44
3.4 CONCRETO COM ALTO TEOR DE CINZA VOLANTE	45
3.4.1 Método de dosagem	45
3.4.2 Planejamento fatorial.....	48
3.4.3 Mistura com alto teor de cinza volante	50
3.4.4 Moldagem e cura dos corpos de prova	51
3.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	52
3.5.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>Slump Test</i>)	52
3.5.2 Ensaio de manutenção da trabalhabilidade do concreto	53
3.5.3 Calor de hidratação	53
3.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	54
3.6.1 Ensaios de resistência à compressão	54
3.6.2 Módulo de elasticidade estático.....	55
3.6.3 Ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos.....	58
3.6.4 Análises de termogravimetria (TGA e DTG)	59
3.6.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	60
3.6.6 Condutividade térmica	62
3.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	64
3.7.1 Propriedades das misturas V1 e VP.....	64
3.7.2 Fluxo de calor total	66
3.7.3 Condições de contorno	66
3.7.4 Geometria do corpo de prova.....	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1 POZOLANICIDADE DA CINZA VOLANTE	69
4.1.1 Ensaio de peneiramento	69
4.1.2 Composição química da cinza volante	70
4.1.3 Massa específica das cinzas volantes	71
4.1.4 Distribuição granulométrica das cinzas volantes.....	71
4.1.5 Índice de desempenho com cimento Portland.....	73
4.2 COMPARATIVO ENTRE CINZA VOLANTE COMUM E CINZA VOLANTE MOÍDA	74
4.2.1 Ensaio de abatimento do tronco cone e manutenção da trabalhabilidade.....	75

4.2.2 Calor de hidratação	76
4.2.3 Massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos..	77
4.2.4 Resultados DTG e TGA	78
4.2.5 Resistência à compressão.....	80
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROJETO FATORIAL.....	81
4.3.1 Resistência à compressão aos 28 dias.....	83
4.3.2 Resistência à compressão aos 115 dias.....	86
4.3.3 Abatimento do tronco de cone (<i>Slump test</i>)	90
4.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DA MISTURA COM ALTO TEOR DE CINZA VOLANTE	93
4.4.1 Teste do abatimento do tronco cone (<i>slump test</i>).....	94
4.4.2 Calor de hidratação	94
4.4.3 Fluxo de calor total.....	95
4.4.4 Resistência à compressão.....	96
4.4.5 Módulo de elasticidade estático.....	97
4.4.6 Massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos .	99
4.4.7 Condutividade térmica	99
4.4.8 Coeficiente de transmissão superficial de calor.....	100
4.4.9 Termogravimetria DTG e TGA	100
4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	102
4.6 PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DOS CONCRETOS V1 E VP	109
4.6.1 Análise EDS.....	114
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
5.1 CONCLUSÕES.....	122
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124

1 INTRODUÇÃO

O concreto sempre foi importante para o progresso da humanidade. Ele é utilizado desde a idade antiga na execução da maioria das obras necessárias para o desenvolvimento das civilizações, obras como habitações, estradas, pontes, silos e tantas outras. E na mesma proporção que aumenta a população mundial, aumenta também a demanda por concreto, já que são necessárias cada vez mais obras para atender as necessidades da população (GONÇALVEZ *et al.*, 2015).

Este crescimento populacional, segundo a ONU (2015), é exponencial. O número de habitantes no planeta em 1950 era de 2,6 bilhões de pessoas, em 2015 já era de 7,3 bilhões e a projeção para 2050 é de 9,6 bilhões de habitantes.

Acontece que o concreto demanda uma quantidade enorme de recursos naturais e uma grande quantidade de cimento Portland na sua produção. E isso causa sérios problemas para o meio ambiente, pois a produção de cimento libera grandes quantidades de gás carbônico para a atmosfera. Tanto que a indústria do cimento já é apontada como uma das grandes responsáveis pelo aquecimento global (SHAFIGH *et al.*, 2016).

Em contrapartida a utilização de adições minerais em substituição ao cimento Portland, reduz o consumo de cimento na produção de concretos, reduzindo portanto a demanda da indústria cimenteira e, por consequência, reduzindo também a emissão de gás carbônico para a atmosfera. Além disso, o uso dessas adições melhoram significativamente as propriedades mecânicas, térmicas e microestruturais dos concretos.

Neste sentido, Carvalho (2002) diz que o impacto da produção de cimento é inversamente proporcional ao teor de adição mineral incorporado na composição do material cimentício. Portanto pode-se dizer que os cimentos brasileiros do tipo CPIII, com 75% de escória de alto forno, e o cimento CPIV, com 50% de cinza volante, limites máximo fixados pela NBR 16697 (ABNT, 2018), apresentam os melhores desempenhos ambientais dentre os cimentos produzidos no Brasil.

Dentro deste cenário, surge a seguinte questão, é possível utilizar um teor de cinza volante maior do que 50% em substituição ao cimento Portland na elaboração de concretos pozolânicos, afim de diminuir os impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira?

1.1 JUSTIFICATIVA

O concreto é um material prático e econômico, que pode ser utilizado na construção dos mais variados tipos de obra. Porém seu uso gera um desequilíbrio, de um lado tem-se a crescente demanda por concreto na medida que a população mundial cresce aceleradamente e, do outro lado, os grandes impactos ambientais causados pela produção de cimento.

Neste cenário a utilização de adições minerais em substituição parcial do cimento Portland em concretos surge como uma alternativa viável para a solução do problema. A utilização de adições minerais além de dar destino a subprodutos que seriam tradados como simples rejeitos, ainda proporciona ao concreto excelentes benefícios em suas propriedades mecânicas, térmicas e microestruturais.

A cinza volante é uma das adições minerais mais utilizadas em substituição ao cimento Portland. Concretos com cinza volante apresentam boa trabalhabilidade, baixo calor de hidratação, maior durabilidade, assim como maior resistência à agentes agressivos. Os cimentos do tipo CPIV são muito utilizados em obras com grandes volumes de concreto, como barragens, uma vez que diminui a possibilidade de fissuras, provenientes do calor de hidratação, em concretos massa. Além disso, concretos com cinza volante apresentam menor porosidade na zona de transição pasta/agregado, o que dificulta a penetração de agentes agressivos no concreto.

Desta forma, aprimorar o conhecimento sobre a utilização de cinza volante em altos teores em substituição ao cimento e sua influência nas propriedades mecânicas, térmicas e microestruturais dos concretos é importante e justifica a realização desta pesquisa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar o efeito da incorporação de altos teores de cinza volante nas propriedades físicas, químicas, térmicas e microestruturais de concretos de cimento Portland.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar a viabilidade do uso do rejeito cinza volante como material pozolânico.
- Verificar como a utilização de cinza volante comum, sem nenhum tipo de tratamento (forma na qual é fornecida pelas termelétricas), afeta as propriedades físicas, químicas, térmicas e mecânicas de concretos com cimento Portland.
- Desenvolver um modelo de regressão, por meio de planejamento fatorial, para produção de concretos contendo altos teores de cinza volante.
- Simular numericamente a variação de temperatura interna de um corpo de prova, gerada pela troca de calor entre o concreto e o meio ambiente durante o processo de cura do mesmo.
- Contribuir na solução do problema que a indústria do concreto gera ao meio ambiente, buscando alternativas para aumentar os limites de cinza volante em substituição ao cimento Portland na produção de concretos.
- Gerar informações para estudos futuros de simulação Termomecânica em concretos com altos teores de cinza volante.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos que embasaram os estudos desta pesquisa, tais como aquecimento global e o impacto ambiental da indústria mundial do concreto, as propriedades do concreto e as vantagens da utilização de cinza volante, assim como, um resumo sobre planejamento fatorial e sobre simulação numérica computacional.

2.1 AQUECIMENTO GLOBAL

O aquecimento global é hoje uma das questões ambientais que mais preocupa a humanidade. Um estudo recente divulgado pelo escritório britânico de meteorologia mostrou que de janeiro a setembro de 2015, a temperatura média da Terra teve um aumento de 1,02 °C em relação à média observada entre os anos de 1850 e 1900 neste mesmo período. Sendo a primeira vez que se registrou um aumento dessa magnitude. Acredita-se ainda, que este crescimento será cada vez mais acelerado, já que a atividade econômica e industrial é cada vez mais intensa no planeta (MET OFFICE, 2015).

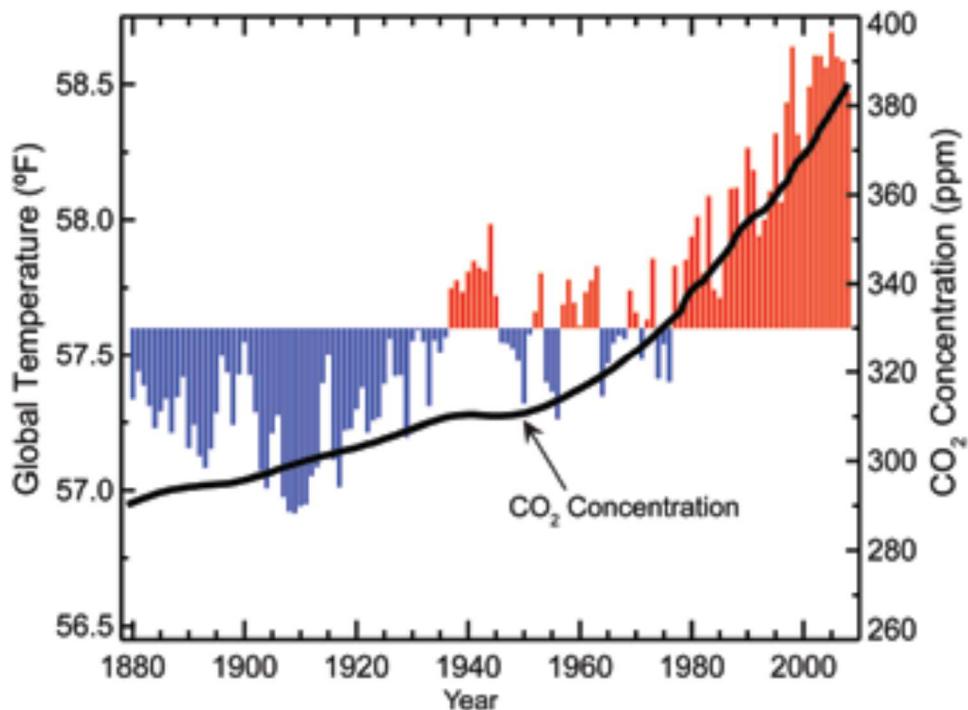
O termo aquecimento global refere-se ao pequeno e constante aumento da temperatura média da superfície da terra devido ao efeito estufa. Os gases de efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, retém o calor na superfície da terra e na atmosfera interior, aquecendo assim, todo o planeta (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Ainda segundo o autor, no final do século 20 tornou-se claro que o crescimento populacional e, por consequência, a industrialização e urbanização no mundo está acontecendo a uma velocidade que não é sustentável. Diversos estudos independentes realizados por várias instituições de pesquisa no mundo todo mostram que o clima está mudando, o que representa uma série ameaça a vida humana e ao planeta Terra, aumentando a frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, tempestades e inundações.

Karl *et al.* (figura 1) mostrou que existe uma relação direta entre a temperatura da média da superfície da terra e a concentração atmosférica de CO₂, que corresponde a 85% dos gases do efeito estufa. De acordo com o autor a concentração de CO₂ em 2012 foi de 394 ppm, sendo a maior medição já registrada na história da

humanidade, esse valor representa um aumento de cerca de 40% em relação a concentração de CO₂ registrada no período pré-industrial, que foi de 280 ppm.

Figura 1 - Relação entre a temperatura global e a concentração de CO₂ na atmosfera.



Fonte: Karl *et al.* (2017).

Por fim, Mehta e Monteiro (2014) concluem, que as emissões de dióxido de carbono atribuídas as atividades humanas estão aumentando exponencialmente e estão mudando o clima global num ritmo acelerado que ameaça a sobrevivência da vida humana na Terra e também do meio ambiente.

2.2 IMPACTO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA MUNDIAL DO CONCRETO

Como citado anteriormente, o efeito estufa é um dos principais fatores do aquecimento global, devido ao aumento da concentração de gases na atmosfera, principalmente CO₂, CH₄ e N₂O. As atividades industriais e os meios de transportes são os maiores responsáveis pelo incremento do teor de CO₂ na atmosfera. Entre os setores industriais, a construção civil se destaca negativamente nesse sentido, onde o concreto é responsável por uma importante parcela do impacto gerado ao meio ambiente. Estima-se que sejam produzidos mais de 25 bilhões de toneladas de

concreto por ano, isso significa que o concreto é o material mais consumido pela humanidade, depois da água (ISAIA E GASTALDINI, 2004; WBCSD, 2009).

Além da grande quantidade de recursos naturais e da alta demanda energética necessária na produção de concreto, existe ainda outro agravante, o alto consumo de cimento utilizado na sua fabricação. A indústria do cimento é responsável por aproximadamente 3% de toda emissão mundial de gases de efeito estufa e aproximadamente 5% de toda emissão de CO₂ do planeta (WBCSD, 2002). Para cada tonelada de cimento produzida é lançado na atmosfera aproximadamente 800 kg de dióxido de carbono, sendo que em 2012 foram utilizadas aproximadamente 3,7 bilhões de toneladas de cimento Portland em construções em todo o mundo (U.S., 2013). Somente no Brasil, entre os anos de 2009 a 2013, a produção de cimento saltou de 51,7 milhões de toneladas para 70,2 milhões, ou seja, um aumento de quase 36% em apenas cinco anos e, muito provavelmente, essa deverá ser a tendência por muitos anos.

O cimento Portland é produzido a partir de uma mistura de compostos a base de cálcio, originados da moagem de calcários e carbonatos diversos, aquecidos a 1450°C. O processo de aquecimento gera uma matéria-prima nodular intermediária, o clínquer, que é resfriado e moído com gesso e materiais corretivos em moinho rotativo, até gerar o cimento (SELLITTO *et al.*, 2013; TEODORO *et al.*, 2013).

O calcário é a principal matéria-prima do cimento, constituído basicamente por carbonato de cálcio (CaCO₃) e impurezas, tais como magnésio, silício, alumínio e ferro. Quando exposto à temperatura acima de 800 °C, uma parte do CaCO₃ se decompõe em 0,56 partes de CaO e 0,44 de CO₂. Sendo nesta etapa que o CO₂ é liberado para a atmosfera.

Com objetivo de diminuir o impacto ambiental gerado pela indústria do cimento, desde a segunda metade do século XX, tem-se utilizado adições minerais em substituição por parte do cimento nos concretos. A substituição de cimento por adições minerais além de trazer diversas vantagens técnicas e econômicas ao concreto, também traz benefícios no âmbito ambiental, pois ajuda na redução de emissão de CO₂, uma vez que diminui a demanda de produção de cimento (ISAIA E GASTALDINI, 2004).

Adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, geralmente mais finos que o cimento, que podem ser adicionados ao concreto em concentrações variadas (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Segundo Dal Mollin (2011) as adições minerais podem ser classificadas em 3 grandes grupos:

- Materiais cimentantes: que não necessitam de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes (exemplos, escória de alto forno e cinza volante com alto teor de cálcio, $\text{CaO} > 10\%$);
- Materiais pozolânicos: que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio desde que na presença de água, formando compostos com propriedades cimentantes (exemplos, cinza volante com baixo teor de cálcio, $\text{CaO} < 10\%$, e sílica ativa);
- Fíler: materiais finamente divididos e sem atividade química, que causam o efeito físico de empacotamento granulométrico, também conhecido como efeito filer (exemplos calcário e pó de quartzo).

Os concretos com cinza volante ou escória de alto forno são usados mundialmente pela indústria do concreto. Na Europa, os concretos pozolânicos, são muito conhecidos pela durabilidade a longo prazo contra ataques por sulfato e ataque pela água do mar. Um estudo recente na América do Norte mostrou que é possível produzir traços de concreto de alto desempenho contendo de 50% a 60% de cinza volante em substituição ao cimento Portland. Portanto, em um futuro próximo as cinzas volantes serão uma ótima opção para reduzir o impacto ambiental da indústria de cimento e concreto, principalmente em países como a China, Índia e EUA, onde a cinza volante está disponível em grandes quantidades (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

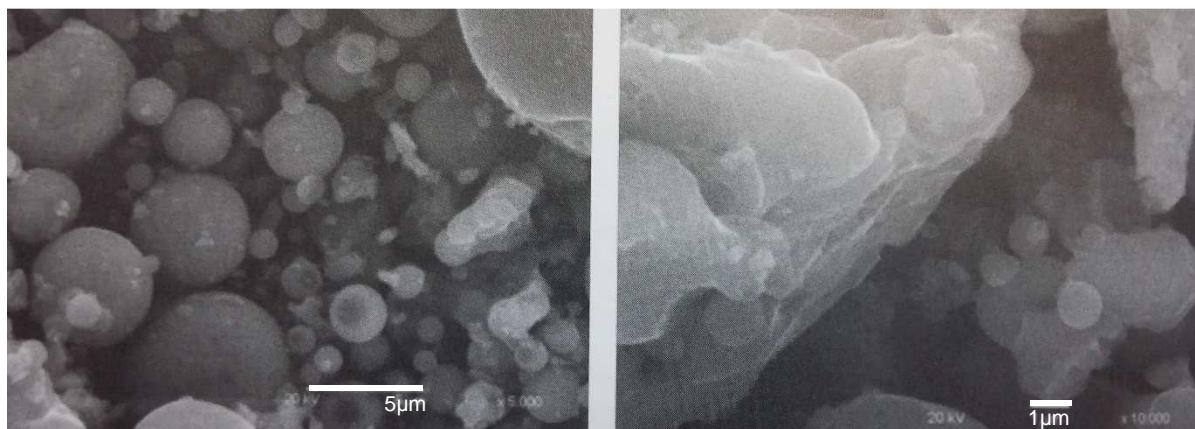
Além disso, assim como as demais adições minerais, a cinza volante é um resíduo que descartado em locais impróprios, gera risco de contaminação do solo e fontes de água. Sendo que para as empresas geradoras, este resíduo torna-se um problema em relação ao descarte final. Portanto sua utilização no concreto ajuda a reduzir o impacto ambiental também neste sentido (ARULRAJAH *et al.*, 2016).

2.3 CINZA VOLANTE

A cinza volante, também chamada de cinza leve, é um subproduto proveniente da queima do carvão mineral em usinas termelétricas. É um resíduo sólido, finamente dividido, geralmente de formato esférico e bem definido (figura 2), formado na câmara de combustão das caldeiras. As cinzas formadas são transportadas pelo fluxo dos gases da combustão e coletadas por precipitadores eletrostáticos. A parte capturada

por precipitadores eletrostáticos, representa cerca de três quartos do total produzido por caldeiras, que são as cinzas volantes. As demais cinzas, mais densas, permanecem no fundo da caldeira e são chamadas de cinzas pesadas. A cinza volante é considerado um material pozolânico devido à sua capacidade de reação com o hidróxido de cálcio, em presença de água, originando novos compostos com propriedades ligantes (KIHARA, 1983; FUNGARO; SILVA, 2002).

Figura 2 - Micrografia de cinza volante. Magnificação: (a) 5.000x, (b) 10.000x.



Fonte: Dal Molin (2011).

As cinzas volantes têm como principais componentes a sílica, a alumína, o óxido de ferro e o cal, além de possuir pequenas quantidades de carbono. A quantidade desses componentes é usada como parâmetro para a sua classificação. Cinzas com altos níveis de carbono são resultado de perdas no processo de ignição e dos resultados incompletos dos processos de combustão (RECENA, 2011; CEZAR, 2011).

Segundo a ASTM C 618 (2005), as cinzas volantes são classificadas em duas classes: C e F. Quando a soma dos teores dos compostos de sílica, alumína, óxido de ferro e de cálcio for maior que 50%, são classificadas como classe C. Quando a soma desses teores ultrapassam 70%, são classificadas como classe F.

As cinzas volantes categorizadas na classe F são originárias da queima de carvão betuminoso e, por isso, possuem baixo teor de cálcio e consequentemente não têm propriedades cimentantes. Já as cinzas volantes de classe C, originárias da queima de carvão subbetuminoso, possuem grandes quantidades de cálcio, apresentando assim propriedades cimentantes na presença de água (CEZAR, 2011).

As propriedades químicas das cinzas volantes variam consideravelmente de uma usina termelétrica para outra, assim como entre diferentes lotes de uma mesma usina, podendo ser consequência da origem do carvão mineral utilizado na queima, dos procedimentos de coleta, dos métodos de combustão e do próprio formato das partículas, o que torna complexo o estudo da influência da cinza volante no comportamento mecânico dos concretos. Estudos mostram, porém, que a qualidade das cinzas tem melhorado progressivamente com o passar dos anos (MEYER, 2009; RECENA, 2011; HARDJITO; RANGAN, 2005).

As cinza volantes possuem elevada finura e as partículas podem variar entre menos que 1 µm até partículas com 100 µm de diâmetro, sendo que seu tamanho depende do grau de pulverização do carvão, do processo térmico envolvido e do tipo de filtro instalado na usina (CEZAR, 2011; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003).

As partículas de cinzas volantes apresentam morfologia esférica que pode se apresentar de forma sólida ou oca. Neste último caso, podem ser chamadas, ainda, de cenosferas (quando completamente vazias internamente) ou plerosferas (completa de numerosas esferas reduzidas). Além disso, o material é formado por uma combinação de fases amorfas e cristalinas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A cinza volante é uma das adições minerais mais utilizadas para substituir parte do cimento Portland em concretos. Segundo o último relatório do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o volume total de cimento produzido no Brasil em 2013 foi de 70,16 milhões de toneladas, onde o cimento Portland pozolânico (CPIV) representa cerca de 14% da produção nacional. O teor de cinza volante incorporado no CPIV atualmente pode variar de 15 a 50% conforme orienta a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são responsáveis por 98,6% de toda produção de carvão mineral do Brasil (DNPM, 2014). Atualmente estima-se que 50% de toda cinza volante gerada nas termelétricas do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é utilizada pela indústria cimenteira e ainda uma parcela complementar pelas centrais de concreto, sendo as Termelétricas de Presidente Médici e Jorge Lacerda as duas principais geradoras de cinzas volante do país (HOPPE, 2008).

Sobre as reservas naturais de carvão, indispensável na geração da cinza volante, o Instituto de Geociências e Recursos Naturais da Alemanha estima que existem 968,2 bilhões de toneladas de carvão depositadas em reservas no mundo, representando o equivalente a 120,7 anos de consumo, seguindo a atual demanda de

produção de energia elétrica (WITZKE, 2018). Neste mesmo sentido, a Associação Mundial do Carvão apresenta 891 bilhões de toneladas de carvão em reservas, suficiente para 110 anos de consumo (WORLD COAL ASSOCIATION, 2015).

Os cimentos com adição mineral começaram a ser comercializados no Brasil em 1969, no Rio Grande do Sul, utilizando cinzas volantes coletadas na Termoelétrica de Charqueadas. Anteriormente, houve o uso esporádico de argila calcinada na obra da barragem de Jupiá, no Rio Paraná, em 1965 (SILVA, 2010).

A utilização de material pozolânico se dá de duas formas, como adição ao cimento Portland durante sua fabricação, gerando os cimentos compostos, como é o caso do CPIII e CPIV, essa forma é mais usual em países como Brasil, França e Alemanha, ou adicionado diretamente ao concreto nas centrais dosadoras, como é o caso nos Estados Unidos. Independentemente disso, o resultado final é semelhante: a adição mineral interage química e fisicamente com os produtos de hidratação do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta (SILVA, 2010).

Sabe-se que as adições minerais, especialmente as pozolanas, atuam na microestrutura da pasta e na interface pasta/agregado, também chamada de zona de transição, através da formação de compostos hidratados secundários que refinam os poros. Por isso, a microestrutura se torna mais fina e homogênea, aumentando a compacidade e resistência da pasta cimentícia (ISAIA, 2007).

2.4 EFEITO QUÍMICO DO CIMENTO E DA CINZA VOLANTE

Primeiramente convém observar que na química do cimento é corrente adotar uma nomenclatura simplificada para os compostos químicos, substituindo-se os óxidos por letras. No caso do cimento Portland seus principais constituintes são expressos como (ISAIA, 2011):

- Silicato tricálcio: C_3S (corresponde de 45 a 60% do clínquer);
- Silicato dicálcio: C_2S (15 a 30%);
- Aluminato tricálcio: C_3A (6 a 12%);
- Ferroaluminato tetracálcio: C_4AF (6 a 8%).

A função dos cimentos em mistura com a água é aglomerar partículas ou agregados quaisquer e ligá-los pela formação de produtos hidratados com desenvolvimento de resistência mecânica. Essa interação entre água e cimento é

denominada reação de hidratação. A reação de hidratação é um processo exotérmico, ou seja, libera calor enquanto a reação química ocorre (ISAIA, 2011).

Na reação de hidratação as duas principais fases silicatos do cimento Portland, C₃S (também chamado de Alita) e o C₂S (Belita), reagem com água formando principalmente a fase de cálcio hidratada (também chamado de silicato de cálcio hidratado, abreviado como C-S-H) e os cristais de hidróxido de cálcio (também chamados de portlandita, abreviado como CH) em uma reação primária e principal. O C-S-H corresponde de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento e fornece a maioria da resistência e durabilidade da pasta, representando assim a fase mais importante das propriedades da pasta. O CH corresponde de 20 a 25% e apresenta crescimento lamelar, possui estequiometria definida e morfologia variável, de grandes prismas hexagonais a finos e alongados cristais, além de possuir área de superfície muito menor do que a do C-S-H. A facilidade de sua clivagem facilita a propagação intercristalina das fissuras, portanto não contribui muito para a resistência do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

No caso das adições minerais, como a cinza volante, o efeito químico está associado a capacidade de reação da adição com o hidróxido de cálcio (CH) formado durante a hidratação do cimento Portland para formar compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado, C-S-H, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratada (ISAIA, 2011).

O efeito químico obtido da reação entre a adição mineral e o hidróxido de cálcio é denominado reação pozolânica e de forma geral sua reação é lenta, desta forma a liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também são lentos. Porém, vale lembrar que a velocidade da reação pozolânica está relacionada com a área de superfície específica das partículas, podendo ser acelerada no caso de partículas mais finas. Além disso os produtos das reações são muito eficientes em preencher os espaços capilares, melhorando o desempenho dos concretos, principalmente a resistência e a impermeabilidade (MEHTA E MONTEIRO, 2008)

Nesse mesmo sentido Hoppe (2008), afirma que as adições minerais ativas, além das vantagens ambientais e econômicas, alteram a cinética de reação do cimento Portland e interagem com o hidróxido de cálcio, produto de reação das fases silicatos do clínquer, formando compostos hidráulicos secundários que modificam a microestrutura da pasta. As modificações normalmente melhoram o desempenho do material no estado endurecido, ou seja, a matriz passa a ter maior durabilidade.

Além disso, concretos com cinza volante geralmente apresentam boa trabalhabilidade, baixo calor de hidratação (uma vez que possui menos cimento para hidratar), que por consequência diminui também a retração durante o processo de cura, e tem maior durabilidade quando comparados aos concretos com cimento Portland comum (IGNJATOVIC *et al.*, 2016).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o uso de cinza volante reduz a temperatura de hidratação quase que numa proporção direta à quantidade de cimento Portland substituído, sendo até considerado o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas como a metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland. Neste sentido, conforme cita Dal Molin (2011), inúmeros são os casos de utilização de adições minerais em obras de concreto onde a redução do calor de hidratação é essencial, como barragens ou na concretagem de grandes volumes de concreto. A redução no calor de hidratação diminui a possibilidade de fissuras de retração durante a cura, o que aumenta a durabilidade do concreto, principalmente em ambientes com presença de cloretos, uma vez que dificulta a entrada de agentes agressivos no concreto.

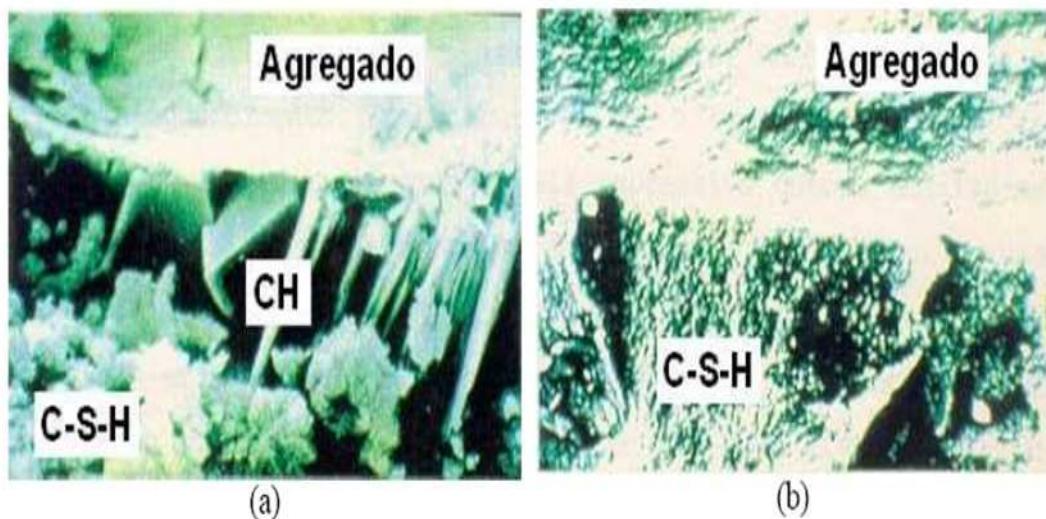
Essa redução no calor de hidratação implica nos concretos pozolânicos a baixa resistência à compressão nas idades iniciais. Geralmente concretos pozolânicos apresentam resistência à compressão menores do que concretos com cimento comum nos primeiros 7 dias de cura. Essa baixa resistência inicial geralmente é compensada nas idades finais de cura, principalmente a partir dos 28 dias. Kovtun *et al.* (2016), mostram que é possível reduzir essa diferença de resistências nas primeiras idades, utilizando técnicas de cura em altas temperaturas, que aceleram o processo de ativação alcalina das pozolanas, aumentando assim a resistência à compressão nas primeiras idades de cura. Algumas dessas técnicas são: cura com calor seco, cura a vapor, cura através de micro-ondas ou ainda cura elétrica direta, onde aplica-se uma corrente elétrica através do concreto para acelerar o processo de cura por meio de aquecimento ôhmico direto.

Segundo Dal Molin (1995), a utilização de pozolana também protege o aço da despassivação por difusão de íons de cloreto, uma vez que as cinzas volantes modificam a estrutura da matriz hidratada, devido a formação de compostos hidratados secundários de C-S-H por atividade pozolânica, o que diminui o tamanho médio dos poros e, por consequência, a interconectividade entre eles, aumentando assim a tortuosidade da rede capilar e dificultando a difusão de íons de cloreto na

estrutura. As cinzas volantes também reduzem a porosidade da zona de transição (figura 3), o que tende a reduzir ainda mais a susceptibilidade para migração de íons de cloreto, além de proporcionar maior resistência mecânica aos concretos. Geralmente concretos usando cinzas volantes tem um nível muito baixo de penetração de íons cloreto. Hoppe *et al.* (2013) mostraram em seus estudos que concretos com cimento puro, apresentam uma taxa de migração cinco vezes maior do que concretos contendo altos teores de cinzas volantes.

Uma desvantagem conhecida na utilização de cinza volante é que concretos pozolânicos quando expostos a altas temperaturas tendem a perder resistência à compressão mais rapidamente do que concretos produzidos com cimento puro, a partir de dadas temperaturas. Khan e Abbas (2014) mostraram que inicialmente a resistência à compressão do concreto aumenta com o aumento da temperatura, até cerca de 300°C. Isso ocorre devido a poro pressão que é criada quando a umidade presente nos poros do concreto evapora e tende a expandir. Porém a partir desse limite de temperatura, a resistência tende a cair muito rapidamente e o concreto entra em colapso.

Figura 3 - (a) zona de transição pasta / agregado de um concreto convencional, (b) zona de transição pasta / agregado de um concreto com adição mineral.



Fonte: Dal Mollin (1995).

2.4.1 Carbonatação

A carbonatação em concretos é estudada há mais de seis décadas, sendo definida como um processo físico-químico que progrediu lentamente no interior das estruturas de concreto pela penetração do CO₂ a partir da superfície externa para a interna. Ela ocorre naturalmente, dependendo apenas da concentração do gás dióxido de carbônico atmosférico e da variação de umidade. O fenômeno também é definido como a reação de neutralização da água do poro saturada de hidróxido de cálcio e dos compostos alcalinos hidratados contidos na matriz do concreto, sob a ação do anidrido carbônico que, por ciclos de secagem e molhagem, precipitam o carbonato de cálcio (RILEM, 1988).

A carbonatação não deteriora o concreto, mas reduz a alcalinidade, o pH do concreto, que originalmente se encontra em valores superiores a 12,5, para valores inferiores a 8,5 após as reações de neutralização. Essa redução do pH permite o ataque à armadura (ou despassivação do aço) na presença de umidade conforme mostraram Younsi *et al.* (2011).

Segundo Rilem (1988) o avanço da frente de carbonatação está diretamente atrelado à facilidade que o CO₂ encontra para se difundir através da camada de cobrimento do concreto em um intervalo de tempo. A penetração de CO₂ é regulada pelos mecanismos de transporte e se dá pela difusão de gases por entre os poros e fissuras, ou seja, a estrutura dos poros e a configuração das fissuras com a umidade presente nos vazios são fatores determinantes para o ingresso do CO₂ no interior da matriz cimentícia. A utilização de cinza volante em concretos ajuda neste sentido, uma vez que a matriz mais refinada e com menos fissuras dos concretos pozolânicos, dificulta a penetração do CO₂.

Por outro lado, Parrot (1996) ressalta que as adições minerais proporcionam um consumo da reserva alcalina, em função das reações pozolânicas entre as adições minerais e o cimento, sendo esse um efeito que contribui para o avanço mais rápido da frente de carbonatação. Khunthongkeaw *et al.* (2006) estudaram a carbonatação natural e acelerada de concretos com adições de diferentes tipos de cinza volante e concluíram que, em elevados teores de substituição, ocorreu um aumento da velocidade de carbonatação.

Enfim, não há consenso no estudo sobre os efeitos das adições minerais e a carbonatação em concretos. Por essa razão, encontram-se algumas divergências nas

pesquisas a respeito dos benefícios das adições minerais frente ao fenômeno da carbonatação. Os resultados das pesquisas sobre carbonatação de concretos com pozolanas têm sido bastante conflitantes, pois nem sempre as condições de pesquisa são similares, impossibilitando, assim, uma comparação fidedigna entre os resultados obtidos (TASCA, 2012).

2.5 CONCRETOS COM ALTO TEOR DE CINZA VOLANTE

Os sistemas de concretos utilizando altos teores de cinza volante foram originalmente desenvolvidos por Malhotra e surgiu como uma excelente opção com que será possível construir estruturas de concreto no futuro que serão muito mais duráveis e sustentáveis (e com baixo impacto ambiental) do que estruturas feitas de concreto com cimento Portland convencional. O teor de cinza volante deve ser superior a 50% em massa do total de material cimentício para atender a definição de concreto de alto teor de cinza volante (MALHOTRA E MEHTA, 2005).

No passado concretos com alto teor de cinza volante não apresentavam bom desempenho de resistência mecânica. Isso porque a cinza volante, produzida por usinas termelétricas antigas, possuía diâmetro médio de partículas maiores que as atuais e normalmente continham alto teor de carbono. Porém experiências recentes tem mostrado que a cinza volante de usinas modernas caracterizam-se pelo baixo teor de carbono e alta finura (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Mehta e Langley (2000) descreveram a produção de uma grande fundação monolítica (sem juntas) com concreto com alto teor de cinza volante, medindo 36 m x 17 x 0.62 m. A figura 4 mostra uma etapa da concretagem da fundação tipo *radier* de templo religioso construído na ilha de Kauai, no Havaí, que foi projetada para durar 1.000 anos. Para produzir tal concreto foi essencial controlar as tensões de retração durante a cura do concreto e para tanto foi necessário reduzir radicalmente o consumo de cimento Portland, assim como o consumo de água da mistura. A tabela 1 mostra as proporções de mistura utilizadas para fazer um concreto com resistência à compressão de 20 MPa aos 90 dias de cura, com um limite máximo de 13 °C de aumento de temperatura.

Figura 4 - Lançamento e acabamento do concreto com alto teor de cinza volante.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Tabela 1 - Proporção de mistura do concreto com alto teor de cinza volante.

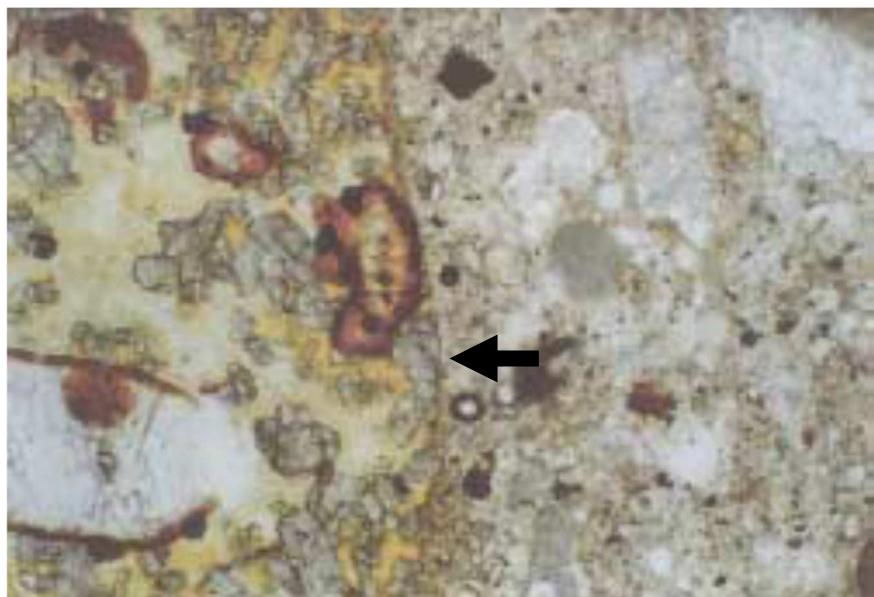
Cimento Portland tipo I	Cinza volante classe F	Água	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Aditivo
106 kg/m ³	142 kg/m ³	100 kg/m ³	944 kg/m ³	1120 kg/m ³	3,50 l/m ³

Fonte: Mehta e Langley (2000).

Ainda segundo Mehta e Langley (2000), na última inspeção, cinco anos após a construção um exame cuidadoso das superfícies do concreto não mostrou nem uma única fissura e a resistência mecânica tinha praticamente o dobro do valor especificado. Uma investigação microestrutural do concreto confirmou que ao contrário de um concreto convencional, os produtos de hidratação da pasta de concreto com alto teor de cinza volante eram muito mais homogêneos e estavam melhor ligados aos agregados, o que é um pré-requisito para um concreto resistente a fissuras e com maior durabilidade.

A figura 5 é uma imagem de micrografia, com magnificação de 40x, de uma partícula de agregado graúdo e a matriz de cimento adjacente, evidenciando que não existe zona de transição entre o agregado e a pasta. Além de não aparecerem microfissuras.

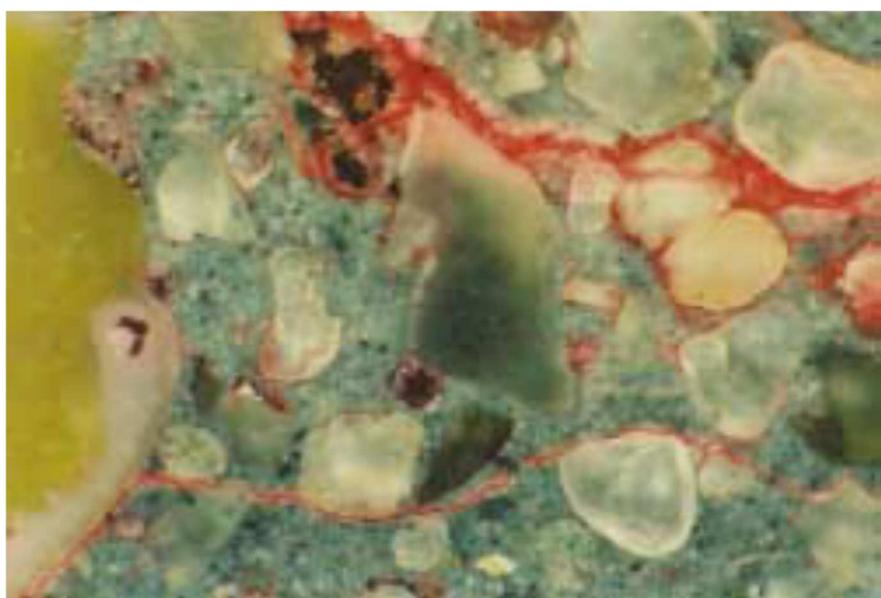
Figura 5 - Micrografia da interface pasta / agregado sem zona de transição.



Fonte: Mehta e Langley (2000).

A figura 6 é uma imagem de micrografia, com magnificação de 40x, que mostra como as microfissuras na zona de transição pasta / agregado se conectam e permitem a penetração de agentes agressivos. O caminho das microfissuras foi rastreado com a ajuda de um corante fluorescente vermelho.

Figura 6 - Micrografia da zona de transição pasta / agregado com microfissura.



Fonte: Mehta e Langley (2000).

Além disso, a utilização de concreto com alto teor de cinza volante representou no projeto de Kauai uma redução de 225 toneladas de produção de dióxido de carbono. Esse montante pode parecer insignificante, mas estabelece uma tendência se o objetivo é construir estruturas duráveis e sustentáveis no futuro (MEHTA E LANGLEY, 2000).

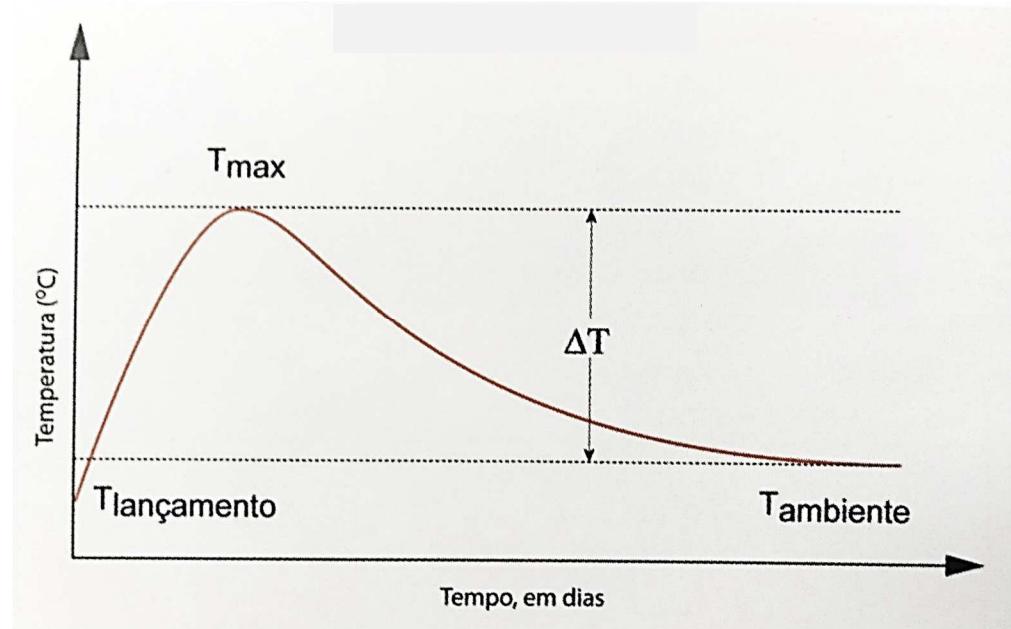
2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DO CONCRETO

O conhecimento das propriedades térmicas do concreto é de fundamental importância quando se busca limitar suas variações de volume e controlar a dissipação do calor gerado durante o processo de hidratação. Estas propriedade tem grande influência no comportamento térmico do concreto com implicações diretas nos custos de produção (refrigeração) e de lançamento e na estabilidade térmica ou de volume das estruturas (FURNAS, 1997).

Ainda segundo o autor, é importante ter conhecimentos sobre temperatura de lançamento do concreto e das limitações volumétricas das peças a serem concretadas de modo a diminuir os riscos de fissuração do concreto durante a cura e processo de hidratação do cimento.

Geralmente sólidos se expandem com o calor e retraem durante o resfriamento. Essa deformação associada a mudança de temperatura depende do coeficiente de expansão térmica do material e, principalmente, da magnitude de elevação ou queda da temperatura. Em estruturas massivas a combinação do calor produzido pela hidratação do cimento e condições baixas de dissipação de calor resulta na elevada temperatura do concreto poucos dias após o lançamento e subsequente, seu resfriamento até a temperatura ambiente faz com que o concreto fuisse. Portanto controlar esta elevação de temperatura, por meio da seleção dos materiais, dosagens e condições de cura, é importante para que a estrutura continue monolítica, livre de fissuras. Em materiais com baixa resistência à tração, como é o caso do concreto, a deformação por retração pelo resfriamento é mais importante do que a expansão que ocorre devido ao calor de hidratação. Isto porque, dependendo do módulo de elasticidade e grau de restrição da peça, a tensão de tração resultante pode ser grande o suficiente para causar fissuração. Este efeito é chamado de fissuração por retração térmica (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Figura 7 - Variação de temperatura ΔT .



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Controlar a variação de temperatura ΔT (figura 7) é uma das formas de se evitar fissuração. Um meio efetivo de reduzir a magnitude da elevação de temperatura é a inclusão de cinza volante em substituição parcial do cimento. As perdas de calor dependem das propriedades do concreto e do ambiente no qual o mesmo foi lançado. Um estrutura de concreto perde calor através de sua superfície e a magnitude desta perda é função do tipo de ambiente em contato direto com a superfície do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

2.6.1 Calor específico

Calor específico é uma das propriedades que influenciam na capacidade de armazenar calor e representa a quantidade de calor necessária para elevar uma unidade de temperatura certa unidade de massa. Sua unidade de medida no Sistema Internacional de medidas é J/kg.k (joule por quilograma e por Kelvin), uma outra unidade mais usual para o calor específico é cal/g.ºC (caloria por grama e grau Celsius). Sendo que no caso do concreto as características dos agregados pouco influenciam no valor do calor específico.

O intervalo norma de variação do calor específico para concretos comuns está compreendido entre 840 J/kg.K e 1.260 J/kg.K ou 0,20 cal/g.°C e 0,30 cal/g.°C (FURNAS, 1997).

2.6.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a propriedade que traduz a habilidade ou facilidade do material em conduzir calor e é entendida como a razão do fluxo de calor e o gradiente de temperatura. É definida como a velocidade do fluxo de calor através de uma espessura unitária, sobre uma área unitária, dos materiais submetidos a uma diferença de temperatura unitária entre duas faces paralelas (ANDRIOLI E SKWARCZYNSKI, 1988).

Para concretos comuns saturados, a condutividade térmica geralmente apresenta valores compreendidos entre 1,4 W/m.K e 3,6 W/m.k ou 0,0033 cal/cm.s.°C e 0,0086 cal/cm.s.°C (FURNAS, 1997).

2.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Como definição, pode-se dizer que um experimento é apenas um teste, ou uma série de testes, que faz parte da maneira de aprendermos sobre como determinado sistema ou processo funciona e a validade das conclusões que são tiradas de um experimento depende de como o experimento foi conduzido. Consequentemente, o planejamento experimental desenvolve um papel muito importante na solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento (MONTGOMERY, 2012).

Segundo Calado e Montgomery (2003) existem três princípios básicos de um planejamento de experimentos, são eles a replicação, a aleatoriedade e a blocagem. Fazer um experimento com réplicas é muito importante pois permite obter o erro experimental, a estimativa deste erro ajuda a verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente significativos, além disso a réplica permite a obtenção de uma estimativa mais precisa dos resultados experimentais. O papel da aleatoriedade num experimento é extremamente importante, pois ao utilizá-la é possível balancear aproximadamente o efeito de qualquer variável de ruído ou fatores não considerados previamente no planejamento. Já a blocagem tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento, quando determinada medida experimental é

feita por pessoas diferentes, o que poderia levar a uma possível não homogeneidade dos dados.

Quando existe o interesse em vários fatores de um experimento, um planejamento fatorial deve ser utilizado. Num planejamento fatorial, para cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as possíveis combinações dos níveis de fatores (também chamado tratamento dos fatores) escolhidos são investigados. Isso torna o planejamento fatorial uma ferramenta muito poderosa na análise estatística de experimentos. Além disso experimentos fatoriais são a única maneira de descobrir se existem ou não interações entre as variáveis (MONTGOMERY, 2012).

Dentre as diversas vantagens da utilização do planejamento fatorial, destacam-se as seguintes (BUTTON, 2005):

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de ensaios;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

Segundo Montgomery (2012) para analisar a importância de um ou mais fatores de um planejamento fatorial, a utilização da análise da variância, ou simplesmente ANOVA, se faz importante, uma vez que a análise de variância compara o efeito de um determinado fator, ou da interação entre os fatores, sobre a variável resposta analisada para diferentes tratamentos. Para a análise de variância em projetos fatoriais com dois fatores as observações podem ser descritas por meio de um modelo estatístico linear, representado pela equação 1:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

(i = 1, ..., a; j = 1, ..., b; k = 1, ..., n)

Onde:

Y = valor observado para a resposta quando o fator A está no i-ésimo nível e o fator B no j-ésimo nível, para uma k-ésima replica;

μ = efeito da média global;
 α_i = efeito do i -ésimo nível do fator A;
 β_j = efeito do j -ésimo nível do fator B;
 $(\alpha\beta)_{ij}$ = efeito da interação entre α_i e β_j ;
 ε_{ijk} = erro aleatório.

A análise de variância (ANOVA) testa a importância de um ou mais fatores comparando as médias da variável resposta em diferentes níveis. A hipótese nula afirma que todas as médias dos níveis dos fatores são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente (MONTGOMERY, 2012). Assim, o teste de hipóteses para o efeito dos fatores A e B e a interação entre eles podem ser definidos de acordo com as equações 2, 3 e 4 respectivamente:

$$\begin{aligned}
 H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0 \\
 H_1: \alpha_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \\
 H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0 \\
 H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0 \text{ para pelo menos um } ij
 \end{aligned} \tag{4}$$

Onde, H_0 é a hipótese nula e H_1 é a hipótese alternativa.

De acordo com Montgomery (2012), a ANOVA testa essas hipóteses pela decomposição da variabilidade total dos dados em partes componentes, comparando os vários elementos dessa decomposição. A variabilidade é medida através da soma total dos quadrados. Os cálculos realizados são geralmente mostrados em uma tabela de análise de variância, representado na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela ANOVA para projeto fatorial com dois fatores.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média Quadrática	F_0
Tratamento A	SQ_A	$a - 1$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
Tratamento B	SQ_B	$b - 1$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
Interação	SQ_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$ab(n - 1)$		
Total	SQ_T	$abn - 1$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	

Fonte: Montgomery (2012).

O efeito de um determinado fator ou da interação entre os fatores sobre a variável resposta analisada é estabelecido pela comparação entre os valores calculados e os tabelados de uma função de distribuição de probabilidade. Os valores F tabelados são estabelecidos para um determinado nível de significância (α). A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o F calculado for maior do que o F tabelado. Essa significância também pode ser analisada através do valor de p. Ao adotar um nível de significância (α) nas análises, fica estabelecido que, se o valor de p calculado for menor que o adotado, o determinado fator ou a interação dos fatores exerce influência significativa sobre a variável resposta analisada (PCZIECZEK, 2017).

2.8 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Neste item será apresentado um breve resumo sobre o método dos elementos finitos e o programa computacional utilizado nesta pesquisa.

2.8.1 Método dos elementos finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que consiste em partitionar um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações

diferenciais que são resolvidas por meio de modelos matemáticos para se obter os resultados. O MEF tem inúmeras aplicações nas áreas de Engenharia, Física e Matemática, tais como: análise das estruturas, estudo das vibrações, transferência de calor, ondas eletromagnéticas, dentre outras. É um método aproximado de cálculo de sistemas contínuos, onde o contínuo é subdividido em um número finito de partes (os elementos), conectadas entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados de nós. A esta subdivisão da estrutura em elementos, denomina-se malha (AZEVEDO, 2003).

Muitos dos problemas de engenharia envolvem condições complexas de geometria, cargas e materiais ou a existência de fenômenos não lineares que precisam ser levados em consideração. A solução para estes tipos de problemas complexos apenas são viáveis através de simulações numéricas.

2.8.2 Programa Computacional Abaqus

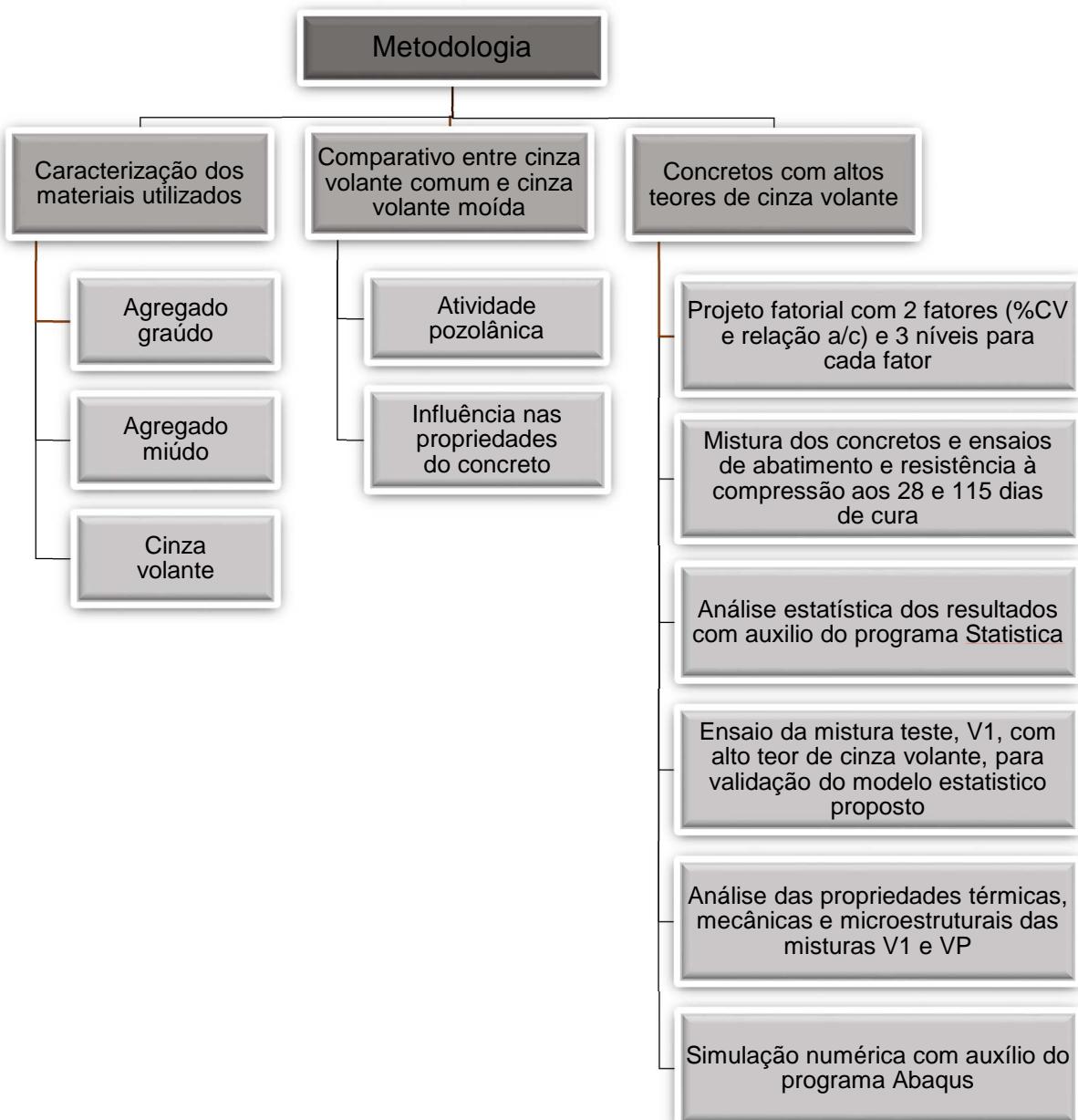
Há alguns programas comerciais de elementos finitos, dentre eles, o programa computacional Abaqus, que foi utilizado neste trabalho para a modelagem computacional da transferência de calor.

Este programa, de grande aplicação em diversas áreas da engenharia, consiste de três etapas: pré-processamento, análise e pós-processamento. No pré-processamento, gera-se o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de contorno, carregamento aplicado e a malha de elementos finitos definidos pelo usuário. O programa ainda permite que o arquivo de entrada de dados seja alterado manualmente pelo usuário. Na análise é onde os resultados são efetivamente obtidos pelo programa. E no pós-processamento o Abaqus possibilita a visualização gráfica dos resultados (DASSAULT SYSTEMES, 2017).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa está apresentada de forma resumida no fluxograma da figura 8. As etapas detalhas são apresentadas posteriormente neste mesmo capítulo.

Figura 8 - Fluxograma do projeto experimental.



Fonte: O autor (2017).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados (figura 9) para elaboração das misturas de concreto desta pesquisa foram cimento Portland tipo CPV, agregado graúdo, agregado miúdo, cinza volante, água e aditivo plastificante.

Figura 9 - Materiais utilizados na elaboração dos traços: (a) agregado graúdo; (b) cimento e cinza volante; (c) agregado miúdo; (d) água.



Fonte: O autor (2017).

3.1.1 Cimento Portland

Nesta pesquisa foi necessário utilizar um cimento sem qualquer tipo de adição de pozolana, afim de não influenciar nos resultados. Portanto o cimento Portland escolhido foi o CPV ARI do fabricante Votorantim Cimentos. O CPV ARI é o cimento com maior teor de clínquer encontrado no mercado (95% de clínquer), não possui adição de pozolana em sua fabricação e contém adição máxima de 5% de fíler calcário (VOTORANTIM, 2016).

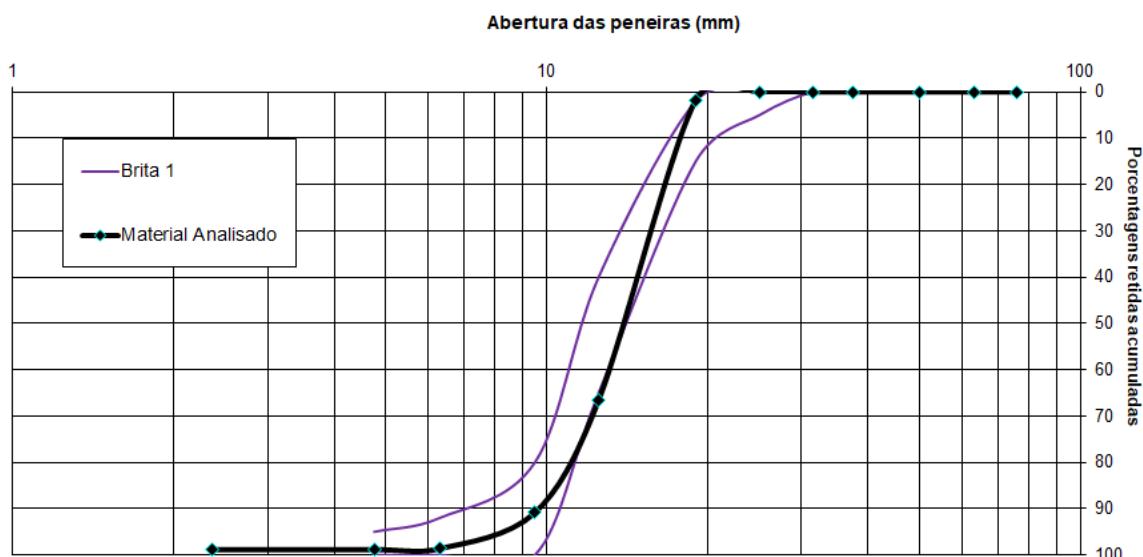
Além disso o cimento CPV ARI possui menor tamanho de partículas e, portanto, maior área superficial (finura Blaine) entre os demais tipos de cimento disponíveis no mercado, o que significa que atinge maiores resistências nas idades iniciais. Essa característica também é importante, uma vez que, concretos com cinza volante, apresentam baixa resistência à compressão nas idades iniciais, deste modo a utilização do CPV ARI compensa esta deficiência dos concretos pozolânicos.

3.1.2 Agregado graúdo

Foi utilizada brita 1. A figura 10 apresenta a distribuição granulométrica do agregado graúdo utilizado. A dimensão máxima característica do agregado graúdo (DMC) é de 19 mm. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 248 (ABNT, 2003).

A massa específica encontrada segundo a NBR NM 53 (ABNT, 2009) foi de 2,76 kg/dm³.

Figura 10 - Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: O autor (2017)

3.1.3 Agregado miúdo

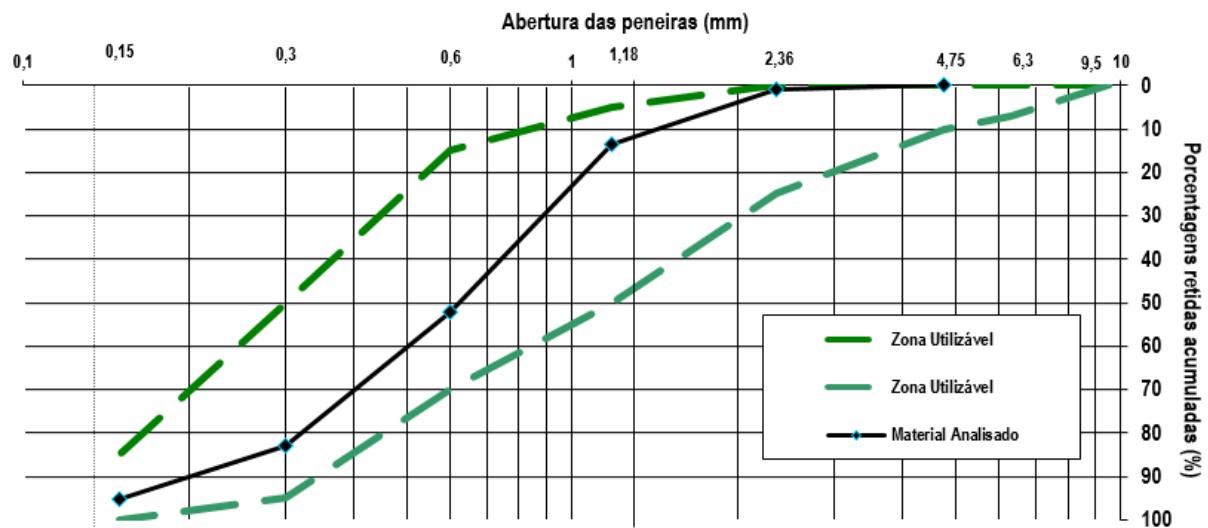
Foi utilizado areia média de rio com módulo de finura de 2,45 e dimensão máxima característica do agregado igual a 2,36 mm.

A figura 11 apresenta a distribuição dos tamanhos de partículas do agregado miúdo utilizado. Os tamanhos de partículas variaram de 0,15 a 2,36 mm. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 248 (ABNT, 2003).

A massa específica encontrada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) foi de 2,60 kg/dm³.

A massa unitária aparente (considerando vazios entre os grãos) encontrada segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006) foi de 1,49 kg/dm³.

Figura 11 - Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O autor (2017)

3.1.4 Cinza volante

A cinza volante (figura 12) utilizada é proveniente do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, situado na cidade de Capivari de Baixo no estado de Santa Catarina. Foi coletada uma amostra de 100 kg no dia 17/07/2017.

Figura 12 - Cinza volante utilizada nos ensaios.



Fonte: O autor (2017).

3.1.5 Aditivo plastificante

O aditivo químico utilizado foi um aditivo plastificante de pega normal, que não possui propriedades retardantes, a base de lignosulfonato. A dosagem utilizada foi de 0,4% sobre a massa do aglomerante (cimento + cinza volante), ficando dentro dos limites de dosagem indicados pelo fabricante.

3.1.6 Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária local, com pH entre 6,3 e 6,8, segundo a Companhia Águas de Joinville.

3.1.7 Ordem de mistura dos materiais

A operação de mistura dos componentes foi realizada em misturador de eixo inclinado com capacidade de mistura de 120 litros no laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville. A sequência de mistura seguiu o modelo proposto pela norma NBR NM 79 (ABNT, 1996), primeiro foi introduzido o agregado graúdo com parte da água do traço, então foi acionado o misturador e introduzido o agregado miúdo, o cimento e a água restante (com o aditivo químico diluído na mesma) e, por fim, a adição mineral.

Após introduzidos todos os materiais, o misturador ficou em funcionamento durante 3 minutos, seguidos por 3 minutos de repouso e por 2 minutos de mistura final.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA CINZA VOLANTE

A norma NBR 12653 (ABNT, 2014) define que uma adição mineral precisa atender alguns critérios, com exigências mínimas, para suas propriedades físicas, químicas e de índice de atividade pozolânica.

3.2.1 Propriedades físicas

Um dos requisitos para uso de cinza volante como material pozolânico é a quantidade de material retido em peneira de malha 45 µm. Conforme define a norma NBR 12653 (ABNT, 2014) o material deve ser peneirado e a quantidade de material retido na peneira não pode ser superior a 20% em massa da quantidade total da amostra peneirada.

Como a cinza volante comum utilizada inicialmente nesta pesquisa não atendeu este requisito foi necessário fazer sua moagem através do moinho de bolas da marca Servitech, modelo CT-241, fornecido pelo laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville. O teste de moagem e peneiramento foi repetido a cada 5 min até que não houvesse material retido na peneira de malha 45 µm.

3.2.2 Determinação do índice de atividade pozolânica

O ensaio foi realizado segundo o procedimento da NBR 5752 (ABNT, 2014), foram preparadas duas argamassas com dosagens diferentes: a argamassa A contendo cimento CPII-F-32, areia normal e água; a argamassa B contendo 25% em massa de material pozolânico (cinza volante) em substituição a massa de cimento CPII-F-32, areia normal e água, conforme tabela 3. Para cada dosagem de argamassa estabelecida, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm.

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi calculado pela equação 5.

$$I_{cimento} = \frac{f_cB}{f_cA} 100 \quad (5)$$

Onde:

I: índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%);

f_cB : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com CPII-F-32 e 25% de cinza volante (argamassa B) e expressa em MPa;

f_cA : resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CPII-F-32 (argamassa A) e expressa em MPa.

Este ensaio foi executando tanto para a cinza volante comum como para a cinza volante moída para fins de comparação.

Tabela 3 - Quantidade de material, em massa, para teste de pozolanicidade.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B ^a
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Cinza volante	-	156 ± 0,2
Areia normal ^b	1872	1872
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo Plastificante	-	c

a) O material pozolânico e o cimento CP II-F-32 foram previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente.

b) Quatro frações ($468 \pm 0,4$) g.

c) Quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência normal da argamassa B em ± 10 mm do obtido com a argamassa A.

Fonte: O autor (2016).

3.2.3 Análise de fluorescência de raios X

Para a análise química das cinzas volantes foi utilizado um espectrômetro de fluorescência de raios X com energia dispersiva, obtendo assim a quantidade de elementos químicos presentes na respectiva amostra. O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC Joinville.

3.2.4 Massa específica da cinza volante

A NBR NM 23 (ABNT, 2001) padroniza o ensaio para a determinação da massa específica do cimento Portland e de outros materiais em pó. Neste ensaio, o frasco volumétrico de Le Chatelier foi preenchido com querosene (líquido não reagente com o material analisado) até a marca entre zero e 1 cm³ e deixado em repouso submerso em água por 30 minutos.

Em seguida, uma quantidade conhecida de cinza volante foi introduzida até ocorrer o deslocamento do líquido entre 18 e 24 cm³ da escala graduada do frasco de

Le Chatelier. Posteriormente, foram efetuados movimentos circulares até que bolhas de ar não subissem mais até a superfície do líquido.

A massa específica da cinza volante foi calculada através da equação 6:

$$\rho_{\text{cinza}} = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Onde:

ρ : massa específica da cinza volante (g/cm^3);

m : massa do material ensaiado (g);

V : volume deslocado pelo material ensaiado (cm^3).

3.2.5 Determinação da distribuição granulométrica

A análise do tamanho de partícula das cinzas volantes comum e moída foi determinada a laser, usando um equipamento analisador de partículas tipo Beckman Coulter LS-230, que analisa tamanhos entre 0,04 e 2000 μm . Essas amostras foram ensaiadas no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais do SENAI de Criciúma/SC.

3.3 COMPARATIVO ENTRE CINZA VOLANTE COMUM E CINZA VOLANTE MOÍDA

Antes de iniciar os testes principais com os concretos com alto teor de cinza volante foram elaborados testes prévios a fim de observar a influência da moagem da cinza volante em substituição de cimento Portland em concretos.

Para tanto foram elaborados três traços de concreto: o traço padrão com 100% de cimento CPV ARI, um traço com 25% de cinza volante comum em substituição ao cimento e um traço com 25% de cinza moída (processada no moinho de bolas) em substituição ao cimento.

Para elaboração do concreto utilizado neste estudo prévio foi escolhido um traço proposto por Mehta e Monteiro (1994), para uma resistência à compressão de 35 MPa. O traço unitário em massa utilizado foi: 1 : 1,12 : 2,69 : 0,46. Seguindo essas proporções foram elaborados os traços para um volume de 18 litros, conforme tabela 4.

Tabela 4 - Quantidades em kg dos materiais utilizados.

Materiais	Concreto padrão	Concreto com CV comum	Concreto com CV moída
Cimento tipo CPV	9,00	6,75	6,75
Cinza volante comum	-	2,25	-
Cinza volante moída	-	-	2,25
Agregado miúdo (areia)	19,13	19,13	19,13
Agregado graúdo (brita 0)	24,20	24,20	24,20
Aditivo (g)	34	34	34
Água	3,76	3,76	3,76
Relação a/c	0,46	0,46	0,46

Fonte: O autor (2016).

Para os traços apresentados acima foram elaborados diversos ensaios com objetivo de comparar as características de concretos com cinza volante comum e cinza volante moída. Os resultados destes ensaios são apresentados no capítulo 4. A partir destes resultados definiu-se que a cinza volante deveria ser moída para ser utilizada nos concretos com altos teores de cinza volante.

3.4 CONCRETO COM ALTO TEOR DE CINZA VOLANTE

3.4.1 Método de dosagem

O traço de partida desta pesquisa foi elaborado a partir do método de dosagem proposto por Campiteli (1993). Considerando um traço de concreto em massa, dado por $1 : a : p : x$ (cimento : areia : pedra : água), é necessário relacionar cada parcela as propriedades que se deseja obter para o concreto que será dosado. Três parâmetros são balizadores para a dosagem: a consistência, a coesão e a resistência à compressão. A consistência se relaciona com os termos do traço através da relação água-materiais secos (H), a coesão se relaciona com os termos do traço através do teor de argamassa seca (α) e a resistência à compressão (fcj) pela relação água-cimento (x).

Desta forma o traço de concreto pode ser expresso em função de suas características H , α e x , que se referem as propriedades de interesse, conforme a equação 7.

$$1 : \frac{\alpha x}{H} - 1 : \frac{x}{H} (100 - \alpha) : x \quad (7)$$

Onde:

α : teor de argamassa seca;

x : relação água/cimento;

H : relação água-materiais secos em %.

Portanto, conhecidos os valores de H , α e x , tem-se um traço inicial para concreto. Sendo que este traço é apenas uma estimativa e precisa ser experimentado em laboratório para verificar se suas propriedades atendem as exigências da pesquisa.

A consistência do concreto é influenciada pela relação água-materiais secos (H), pela dimensão máxima característica e pela massa específica do agregado graúdo. A equação 8 apresenta um modelo matemático para cálculo do H (CAMPITELI, 1994).

$$H = \frac{783 (148 - DMC) + (163 - DMC) S}{4410 Y} \quad (8)$$

Onde:

H : relação água-materiais secos em %;

DMC : Dimensão máxima característica do agregado graúdo em mm;

S : abatimento em mm;

Y : massa específica do agregado graúdo em kg/dm³.

Para cálculo do H utilizou-se os dados obtidos na caracterização do agregado graúdo, que são a dimensão máxima característica do agregado de 19 mm e a massa específica de 2,76 kg/cm³. Adotou-se para o abatimento (ou *slump*) o valor de 120 mm. Dessa forma calculou-se o valor de H que foi de 9,72%.

O teor de argamassa seca, α , foi adotado a partir da Tabela 5, mostrada anteriormente, e é função do módulo de finura do agregado miúdo e da dimensão máxima característica do agregado graúdo. A tabela 5 é uma adaptação feita por Campiteli (1993).

Tabela 5 - Valores estimados para teores de argamassa seca (a).

DMC (mm) do agregado graúdo	Módulo de Finura do agregado miúdo		
	Menor do que 2,4	Entre 2,4 e 2,8	Maior do que 2,8
9,5	55	57	59
19	50	52	54
25	46	48	50
38	43	44,5	46
50	37	39	41
76	33	34,5	36
102	30	31	32
152	27	28	29

Fonte: Campiteli (1993).

Com a determinação do módulo de finura do agregado miúdo que foi de 2,45 e a dimensão máxima característica do agregado graúdo que foi de 19 mm, encontrou-se o teor de argamassa de 52%.

O valor estimado da relação água/cimento (a/c) pode ser adotado a partir da tabela 6, também adaptada por Campiteli (1993).

Tabela 6 - Valores estimados de relações água/cimento.

f_{cj} (MPa)	Estimativa da relação água/cimento – (l/kg)			
	Cimentos do tipo CPI, II, III e IV			CPV
	Classe 25	Classe 32	Classe 40	ARI
10	0,79	0,89	0,96	0,96
15	0,64	0,74	0,81	0,81
20	0,53	0,63	0,71	0,71
25	0,45	0,55	0,62	0,62
30	0,38	0,48	0,56	0,56
35	0,32	0,42	0,50	0,50

Fonte: Campiteli (1993).

Para estimar a relação água/cimento do traço padrão, adotou-se um f_{cj} de 35 MPa. Portanto a relação a/c recomendada para o concreto a ser executado com CPV é de 0,50.

Dessa forma chegou-se ao traço padrão unitário em massa que pode ser representado da seguinte maneira, 1 : 1,68 : 2,47 : 0,50. Ou seja, para cada 1 kg de

cimento, é necessário 1,68 kg de agregado miúdo, 2,47 kg de agregado graúdo e 0,50 kg de água.

O traço padrão foi testado em laboratório para verificação de sua resistência à compressão, consistência e coesão.

3.4.2 Planejamento fatorial

A partir do traço padrão, foram calculados mais dois traços denominados traço forte (com fator água/cimento 0,45) e traço fraco (com fator água/cimento de 0,55), para tanto foi levado em conta os limites de trabalhabilidade do concreto. Para elaboração dos traços forte e fraco, foram mantidos constantes o teor de argamassa (α) e a relação água-materiais secos (H), variando apenas a relação água/cimento. A tabela 7 apresenta o traço unitário em massa para elaboração das misturas controle.

Tabela 7 - Traços unitários em massa.

Traço	Cimento	Areia	Brita	Água
Forte	1	1,41	2,22	0,45
Padrão	1	1,68	2,47	0,50
Fraco	1	1,94	2,72	0,55

Fonte: O autor (2017)

Para o planejamento experimental foi utilizado um projeto fatorial 3^2 , ou seja, dois fatores e três níveis de tratamento para cada fator. O fator 1 é a relação água/cimento, com os seguintes níveis de tratamento: 0,45, 0,50 e 0,55. Enquanto o fator 2 é o teor de cinza volante em substituição ao cimento Portland, considerando os seguintes níveis de tratamento: 30, 50 e 70% de substituição. Os limites dos níveis de tratamento foram definidos de maneira que fosse possível fazer a análise de variância ANOVA, limites muito próximos poderiam gerar resultados parecidos de resistência a compressão, o que poderia comprometer a análise estatística.

Variando-se os fatores teor de cinza volante (%) e a/c, para os traços listados na Tabela 7 foram elaboradas nove misturas de concreto para um volume de 16 litros conforme mostra a tabela 8.

Tabela 8 - Traços do experimento fatorial para volume de 16 litros.

Traço	a/c	Teor de CV (%)	Cimento (kg)	CV (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
1	0,45	30	5,25	2,25	10,57	16,69	3,38
2	0,45	50	3,75	3,75	10,57	16,69	3,38
3	0,45	70	2,25	5,25	10,57	16,69	3,38
4	0,50	30	4,73	2,03	11,30	16,65	3,38
5	0,50	50	3,38	3,38	11,30	16,65	3,38
6	0,50	70	2,03	4,73	11,30	16,65	3,38
7	0,55	30	4,30	1,84	11,89	16,62	3,38
8	0,55	50	3,07	3,07	11,89	16,62	3,38
9	0,55	70	1,84	4,30	11,89	16,62	3,38

Fonte: O autor (2017)

Testes preliminares foram executados com as misturas que poderiam apresentar a pior condição de trabalhabilidade afim de verificar sua coesão e consistência. Para tanto foram testados o traço 3, que possui a maior concentração de cinza volante e a menor relação a/c 0,45 (figura 13) e o traço 7, menor concentração de cinza volante e maior relação a/c 0,55 (figura 14).

Figura 13 - Ensaio de consistência (slump test) da mistura teste do traço 3.



Fonte: O autor (2017).

Figura 14 - Ensaio de consistência (slump test) da mistura teste do traço 7.



Fonte: O autor (2017).

Após verificadas as consistências das misturas 3 e 7, através do teste de abatimento do tronco de cone, o planejamento experimental foi delineado com auxílio do programa Statistica 8.0 e foram produzidas em laboratório as nove misturas, assim como suas réplicas, de forma aleatória, conforme definido pelo programa.

Todas as misturas foram ensaiadas à resistência a compressão aos 28 e 115 dias de cura, também foram medidos os valores de abatimento do tronco de cone (*slump test*), sendo que os resultados foram submetidos a testes estatísticos de análise de variância (ANOVA), a fim de comparar a influência dos fatores teor de cinza volante e relação água-cimento sobre a variável resposta.

Para validar o modelo de regressão proposto através do projeto fatorial foi necessário fazer uma nova mistura (chamada V1) contendo fatores dentro do intervalo estudado. Para tanto foi definido uma %CV de 60 e fator a/c de 0,475. O traço unitário em massa utilizado para V1 foi: 1 : 1,54 : 2,35 : 0,475.

3.4.3 Mistura com alto teor de cinza volante

O traço V1 é considerado um concreto com alto teor de cinza volante, uma vez que possui 60% de CV em substituição ao cimento Portland.

Desta forma suas propriedades físicas, químicas, térmicas e microestruturais foram estudadas e depois comparadas com um traço idêntico, mas sem adição de CV, chamado VP. Essa avaliação tem por finalidade entender a influência de altos teores de cinza volante em concretos, que é o objetivo principal desta pesquisa.

3.4.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem e cura dos corpos de prova de concreto foram realizadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Sendo confeccionados em fôrmas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e moldados em duas camadas com 12 golpes de haste metálica para adensamento de cada camada, figura 15. Após 48 horas da moldagem, os corpos de prova foram então retirados dos moldes e imersos em um tanque com uma solução com água e hidróxido de cálcio, a uma temperatura de 23 °C para cura, conforme figura 16.

Figura 15 - Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2017)

Nesta pesquisa foram moldados 42 corpos de prova para os ensaios comparativos entre as cinzas volantes, 180 corpos de prova para elaboração do projeto fatorial e 31 corpos de prova para os ensaios das misturas V1 e VP. Totalizando 253 corpos de prova de concreto.

Figura 16 - Tanque de cura dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2017)

3.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Neste item são apresentados e descritos todos os ensaios executados para o concreto no estado fresco.

3.5.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*)

O ensaio de abatimento, também conhecido como ensaio *slump test*, é um dos principais parâmetros para verificação da consistência nos concretos. Este ensaio foi realizado conforme norma NM 67 (ABNT, 1998). O ensaio consiste em adensar 3 camadas de massa de concreto em um molde metálico de formato cônico aplicando 25 golpes, com uma haste metálica, em cada camada. Após retira-se o molde em 10 segundos, em posição vertical, e mede-se a diferença entre a altura do molde metálico e a altura da massa de concreto depois de assentada, conforme mostra a figura 17.

Figura 17 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*).



Fonte: O autor (2016).

3.5.2 Ensaio de manutenção da trabalhabilidade do concreto

A perda de abatimento pode ser definida como a perda de fluidez do concreto com o passar do tempo. A mesma ocorre quando a água livre da mistura é consumida pelas reações de hidratação, por adsorção na superfície dos produtos de hidratação e também por evaporação.

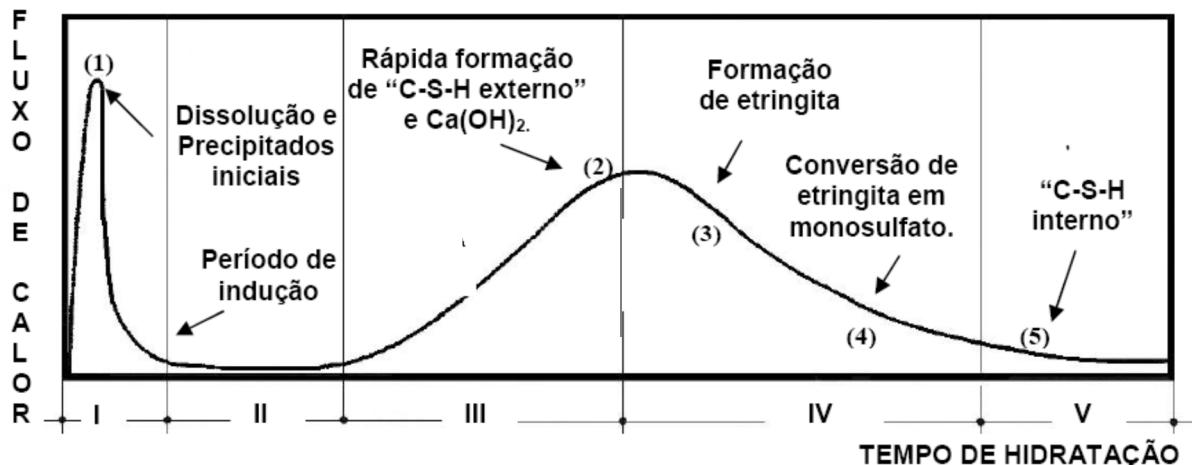
Para este ensaio foi medido o abatimento do tronco cone de cada mistura em intervalos de 15 min, conforme orienta a norma NM 67 (ABNT, 1998).

3.5.3 Calor de hidratação

O calor de hidratação foi medido através do calorímetro da marca Impaclog IP7018, presente no laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville.

Os tempos de início e fim de pega de cada traço foram obtidos através de análise gráfica do calor de hidratação ao longo do tempo, conforme mostra figura 18.

Figura 18 - Gráfico padrão gerado num calorímetro.



Fonte: Kihara e Zampieri (1988).

3.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item são apresentados e descritos todos os ensaios executados para o concreto no estado endurecido.

3.6.1 Ensaios de resistência à compressão

Os corpos de prova, depois de devidamente curados foram submetidos ao ensaio de resistência mecânica à compressão segundo a norma NBR 5739 (ABNT, 2007).

Antes de ensaiados, os corpos de prova tiveram suas faces devidamente preparadas de acordo com a norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Para tornar as faces dos corpos de prova planas e perpendiculares ao seu eixo longitudinal todos foram retificados por meio de retífica pertencente ao laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville. O procedimento consiste na remoção de uma fina camada de material das faces a serem preparadas, de tal forma a não prejudicar a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida.

Para o ensaio da resistência à compressão foi utilizada a prensa hidráulica do laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville, da marca EMIC PC 200, figura 19, com capacidade para 200

toneladas força. Foram ensaiados 144 corpos de prova, sendo 8 corpos de prova para cada traço, nas idades de 28 e 115 dias.

Figura 19 - Prensa EMIC utilizada nos rompimentos dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2017).

3.6.2 Módulo de elasticidade estático

Para ensaio do módulo de elasticidade estático preparou-se uma área limpa e seca do corpo de prova para colagem do *strain gauge*. A colagem do *strain gauge* foi realizada com uma resina especial de cura rápida e, o mesmo, foi colado no sentido vertical, que é o mesmo sentido da aplicação da força (figura 20).

O *strain gage* então foi conectado a uma caixa de ponte completa, que por sua vez é conectada ao equipamento PMX, que é um sistema de aquisição de dados e controle da fabricante HBM (figura 21). Para leitura da força aplicada utilizou-se um transdutor de força modelo C6A (figura 22), da fabricante HBM, que foi conectado ao PMX e acoplado à prensa hidráulica modelo EMIC PC 200. O ensaio foi executado no laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville.

Figura 20 - Corpo de prova com *strain gauge* instalado e pronto para ensaio.



Fonte: O autor (2018).

Figura 21 - PMX e caixa para conexão do *strain gauge*.



Fonte: O autor (2018).

Figura 22 - Transdutor de força.



Fonte: O autor (2018).

Desta forma o PMX fornece os dados da força aplicada, em kN, e a deformação no corpo de prova ao longo da aplicação da força. A partir destes dados gerou-se a curva tensão-deformação (σ - ϵ), uma vez que a área da seção transversal do corpo de prova é conhecida.

O módulo de elasticidade estático de um material sob tensão ou compressão é dado pela declividade da curva σ - ϵ para o concreto sob carga uniaxial. Uma vez que a curva para o concreto é não-linear existem três métodos diferentes para cálculo do módulo de elasticidade e, portanto, três tipos de módulo de elasticidade estático: o módulo tangente, o módulo secante e o módulo cordal. Nesta pesquisa utilizou-se o método do módulo secante, que é dado pelo coeficiente angular de uma linha traçada da origem até um ponto da curva tensão-deformação que corresponde à 40% da carga de ruptura. Dessa forma o módulo de elasticidade secante é calculado pela equação 9 (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s} \quad (9)$$

Onde:

E_s = módulo de elasticidade secante (MPa);

σ_s = tensão correspondente a 40% da carga de ruptura (MPa);

ε_s = deformação no ponto da curva tensão-deformação que correspondente a 40% da carga de ruptura.

3.6.3 Ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2008), que prescreve o ensaio para determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura e de massa específica do concreto endurecido.

Inicialmente os corpos de prova de concreto foram secos à temperatura de 105 °C em estufa por 72 h. Ao término da secagem, mediu-se a massa de cada amostra (M_s). Em seguida, as amostras foram imersas em água à temperatura aproximada de 23°C e mantidas por 72 h nessa condição. Completada essa etapa, as amostras foram colocadas em um recipiente com água, que foi progressivamente levada à ebulação, e mantidos por uma duração de 5 horas. A seguir, após resfriamento natural até a temperatura ambiente, foi registrada a massa da amostra saturada e imersa em água (M_i), com o auxílio de balança hidrostática.

Para finalizar as amostras foram retiradas da água, secas com um pano úmido, e suas massas novamente registradas (M_{sat}).

Os resultados foram obtidos pelas médias das determinações realizadas, e expressas com duas casas decimais. Para a absorção (A), a equação 10 apresenta o resultado em porcentagem.

$$A = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} 100 \quad (10)$$

Onde:

M_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura.

M_s é a massa da amostra seca em estufa.

O índice de vazios (I_v), em porcentagem, é dado pela equação 11:

$$Iv = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_{sat} - M_i} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde:

M_i á a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

A massa específica da amostra seca (ρ) é dada pela equação 12:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (12)$$

3.6.4 Análises de termogravimetria (TGA e DTG)

As análises de termogravimétrica são técnicas usadas para verificar, durante as variações de temperaturas impostas as amostras, as perdas ou ganhos de massa envolvidos na formação dos subprodutos decorrentes da reatividade potencial ou, também, pelo processo de queima do material submetido à elevada temperatura.

Figura 23 - Equipamento Q50.



Fonte: O autor (2018).

Após fratura dos corpos de prova utilizados nos testes de compressão, foram retiradas amostras de argamassa (sem agregado graúdo), moídas no moinho de bolas da marca Servitech, modelo CT-241 (equipamento fornecido pelo laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville) e, por fim, peneiradas na malha 75 μm . Coletou-se então 5g do material peneirado, depositou-se no porta amostra e foram mantidos no dessecador por 7 dias até o momento do teste. Os testes foram elaborados no laboratório de Materiais do Departamento de Química da UNIVILLE em Joinville. As amostras foram analisadas no equipamento marca TA *Instruments*, modelo Q50 e submetidas a um gradiente de temperatura de 25 °C a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera inerte de N₂ a 50 mL/min (figura 23).

3.6.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise de MEV, as amostras foram embutidas em resina epóxi de baixa viscosidade (resina epóxi SQ 2004 e endurecedor SQ3152-bb) para obtenção do vácuo no microscópio (figura 24). Para o lixamento utilizou-se as lixas nº 220, 320, 400, 600 e 1200 de grãos cerâmicos abrasivos e as amostras foram polidas com utilização de alumina e água com pano de polimento. As amostras foram acopladas a um acessório de metal que serviram como peso para aumentar o contato da superfície com o pano de polimento.

Figura 24 - Amostras embutidas em resina epóxi e polidas.



Fonte: O autor (2018).

Após a preparação e lixamento das amostras, as mesmas foram recobertas com material condutor (ouro) com auxílio de equipamento revestidor, modelo Bal-Tec SCD 050 (figura 25), do laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC Joinville.

Figura 25 - Equipamento utilizado para revestimento das amostras.



Fonte: O autor (2018).

Finalmente as imagens das amostras polidas foram obtidas no microscópio eletrônico, modelo Jeol JSM-6701F (*Field Emission Scanning Electron Microscope*), do laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC Joinville (figura 26).

Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado no ensaio.



Fonte: O autor (2018).

3.6.6 Condutividade térmica

Para determinação da condutividade térmica do concreto foi utilizado o condutivímetro do laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da UDESC Joinville. Para este ensaio foram moldadas duas amostras para a mistura VP e duas amostras para a mistura V1, com dimensões de 20x20x6 cm. A execução do ensaio pode ser vista na figura 27.

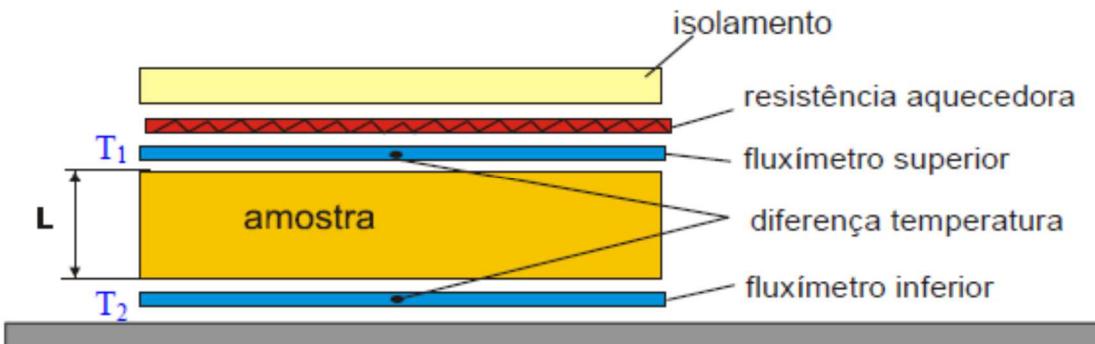
O condutivímetro foi construído seguindo os procedimentos descritos na Norma Técnica ISO 8301 (1991): “*Standart Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*”, mostrado esquematicamente na figura 28.

Figura 27 - Ensaio de condutividade térmica.



Fonte: O autor (2018).

Figura 28 - Arranjo experimental para a medição da condutividade térmica.



Fonte: Effting (2008).

A resistência térmica em regime permanente é determinada a partir da lei de Fourier, dada pela equação 13 em regime permanente.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\frac{(q_1 + q_2)}{2}} \quad (13)$$

Onde:

R: é a resistência térmica ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) em regime permanente;

q_1 e q_2 : são as densidades de fluxo de calor medido pelos fluxímetros 1 e 2 (W/m^2);
 T_1 e T_2 : as temperaturas superficiais da amostra.

Considerando que a amostra é homogênea, é possível determinar a condutividade térmica do material (λ) pela equação 14.

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (14)$$

Onde:

λ : é a condutividade térmica (W/mK);

L : é a espessura do material (m);

R : é a resistência térmica medida ($\text{m}^2\text{K/W}$).

3.7 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para a modelagem computacional utilizou-se as seguintes propriedades das misturas V1 e VP: massa específica, condutividade térmica, resistência térmica, calor específico, calor de hidratação e coeficiente de transmissão superficial de calor.

3.7.1 Propriedades das misturas V1 e VP

Os valores de massa específica utilizados foram encontrados através do ensaio de massa específica, conforme explicado anteriormente neste mesmo capítulo.

Os valores utilizados para o calor específico foram obtidos através da literatura. Para a mistura VP utilizou-se 1.170 J/kg.k, valor dentro dos limites apresentados em Furnas (1997) para concretos similares ao concreto da mistura VP, quando comparados consumo de cimento, relação a/c, tipo litológico do agregado e dimensão máxima do agregado. Para a mistura V1 utilizou-se 920 J/kg.k, conforme sugerido por Bentz *et al.* (2011), para concretos com teor de cinza volante superior a 50% em substituição ao cimento Portland.

O calor de hidratação foi medido através do calorímetro Impaclog IP7018 para ambas as misturas. Para tanto, foi moldado um corpo de prova cilíndrico com 12 cm de altura e 8 cm de diâmetro, que foi mantido dentro de uma caixa isolante de EPS. E

mediu-se a variação de temperatura interna do corpo de prova, durante o processo de hidratação do cimento, com auxílio de um termopar que foi posicionado no centro de gravidade da amostra (figura 29), assim como foi medido a temperatura ambiente dentro da caixa, através de um segundo termopar.

O coeficiente de transmissão superficial de calor é o inverso da resistência térmica total e foi calculado conforme orienta a norma NBR 15575-4 e NBR 15575-5 pela equação 15 (ABNT, 2013).

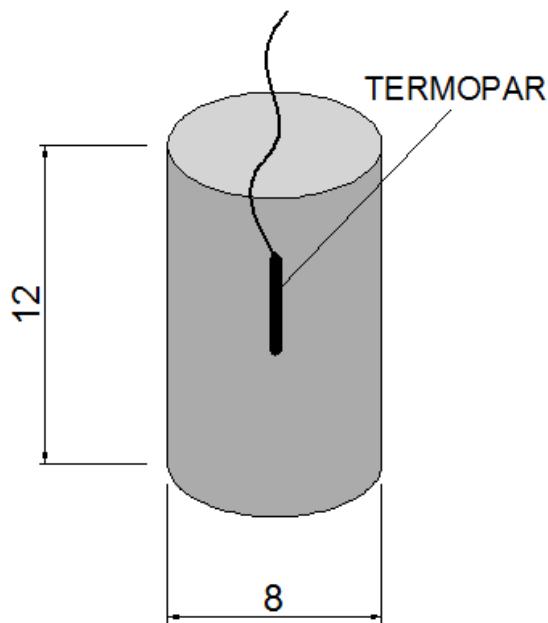
$$U = \frac{1}{R} \quad (15)$$

Onde:

R: é a resistência térmica (m^2K/W) em regime permanente, medida no ensaio de condutividade térmica;

U: é o coeficiente de transmissão superficial de calor ($kcal/hm^2°C$).

Figura 29 - Corpo de prova cilíndrico com termopar posicionado.



Fonte: O autor (2018).

3.7.2 Fluxo de calor total

Segundo Al-Manaseer *et al.* (2007), o fluxo de calor é função da variação de temperatura medida no calorímetro. O fluxo de calor pode ser descrito como a geração de calor ao longo do desenvolvimento da temperatura em uma amostra de concreto e pode ser determinada a partir da equação 16.

$$Q = \frac{dT \rho c}{dt} \quad (16)$$

Onde:

dT : diferença entre o aumento da temperatura adiabática entre dois períodos de tempo sucessivos ($^{\circ}\text{C}$);

dt : diferença de tempo entre dois períodos (h);

ρ : massa específica (kg/m^3);

c : calor específico ($\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$);

Q : fluxo de calor (kcal/hm^3).

Pode-se observar que Q é um acréscimo de carga térmica para um intervalo de tempo dt . A carga térmica inserida como dado de entrada no Abaqus é o fluxo de calor total, ou seja, a soma dos valores de Q acumulado para cada intervalo de tempo dt .

3.7.3 Condições de contorno

O desenvolvimento da temperatura no corpo de prova de concreto é determinado pelo equilíbrio entre a geração de calor de hidratação e a troca de calor com o meio ambiente. Essa troca de calor depende das propriedades térmicas do concreto e também do meio ao qual o mesmo está inserido. O concreto perde calor através de sua superfície e a magnitude dessa perda de calor é função do tipo de ambiente em contato direto com a superfície de concreto. O coeficiente de transmissão superficial de calor influencia nessa troca de calor e portanto deve ser considerada como uma condição de contorno, assim como a temperatura ambiente onde o corpo de prova foi inserido.

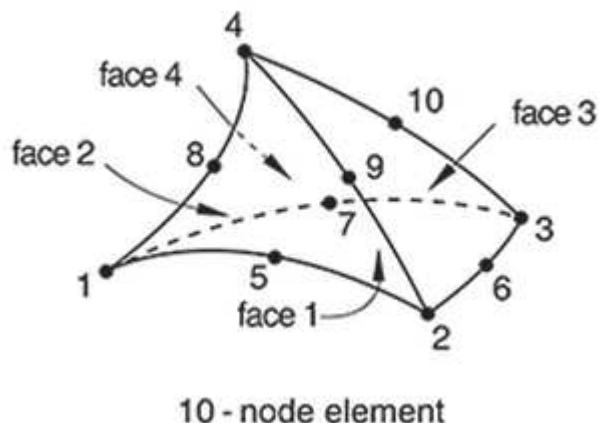
Para este estudo, a temperatura ambiente foi considerada constante, igual a 25,2°C para a mistura VP e 22,6°C para a mistura V1. Essa diferença entre as temperaturas ambientes ocorreu devido aos ensaios terem sido executados em dias diferentes.

3.7.4 Geometria do corpo de prova

A geométrica do corpo de prova utilizada foi um cilindro com 12 cm de altura e 8 cm de diâmetro.

O tipo de elemento usado para modelagem é nomeado dependendo da dimensionalidade do elemento e do tipo de análise, para este estudo o elemento que mais se adequou à análise foi o DC3D10. O DC3D10 é um elemento tetraédrico quadrático sólido de 10 nós. A ordenação dos nós, as faces e a numeração dos pontos de integração desse elemento são mostrados na figura 30.

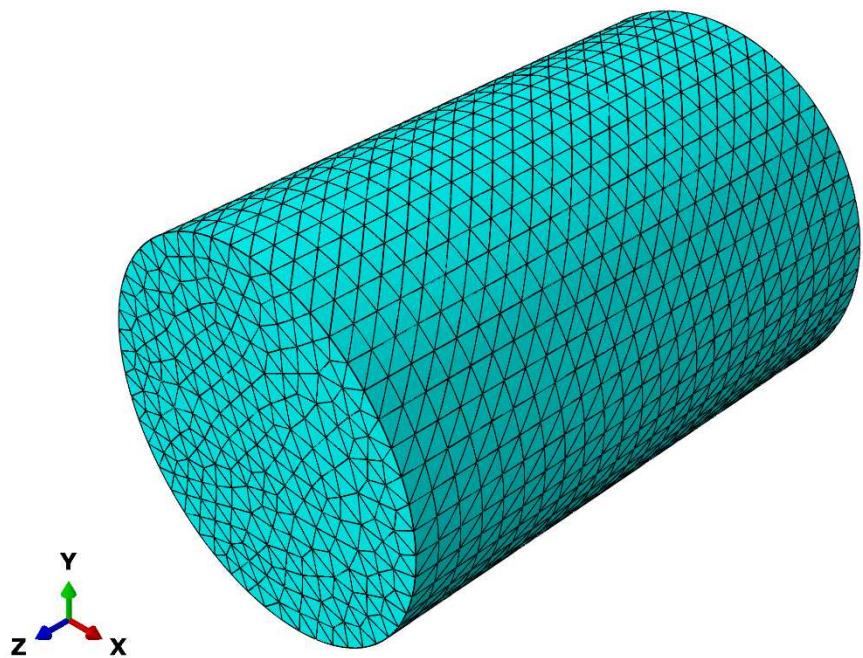
Figura 30 - Ordenação de nós e numeração de faces do elemento finito.



Fonte: Dassault Systemes (2017).

A malha gerada para esta simulação possui 23.372 elementos conectados por 38.510 nós (figura 31).

Figura 31 - Malha de elementos finitos do corpo de prova (Abaqus).



Fonte: O autor (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados referente à caracterização da cinza volante, assim como sua atividade pozolânica. Em seguida será apresentado um comparativo entre as propriedades mecânicas e microestruturais dos concretos com cinza volante comum e cinza moída.

Também serão apresentadas as propriedades mecânicas, térmicas e microestruturais dos concretos com alto teor de cinza volante em substituição ao cimento Portland.

4.1 POZOLANICIDADE DA CINZA VOLANTE

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) existem três requisitos que uma cinza volante deve atender para ser considerada material pozolânico. São eles:

- A quantidade de material retido na peneira de malha de 45 µm deve ser menor que 20% em peso;
- O índice de desempenho com cimento Portland deve ser maior que 90%;
- Possuir em sua composição química uma concentração total de sílica, alumina e óxido de ferro maior do que 70%.

4.1.1 Ensaio de peneiramento

Neste ensaio, 50g da cinza volante comum foram peneirados na peneira de malha de 45 µm. Ficando retido na peneira 21,5 g, o que corresponde a 43% do material, mais que o dobro do limite estabelecido pela norma NBR 12653 (ABNT, 2014) que é de 20%.

Então foram moídos 300 g da cinza volante no moinho de bolas durante 5 min, retirado 50 g do material moído e refeito o teste de peneiramento. Neste segundo ensaio a quantidade de material retido foi de 7,5 g, correspondente a 15% em peso, abaixo do valor estipulado pela norma.

Porém, com objetivo de deixar a cinza volante ainda mais fina, o material foi moído por mais 5 min e o teste de peneiramento foi refeito. Após os 10 min de moagem verificou-se que 100% do material passou pela peneira de 45 µm, não restando nada

retido na peneira. Os resultados do ensaio estão apresentados de forma resumida na tabela 9.

Tabela 9 - Quantidade de material retido na peneira de malha 45 µm.

Tempo de moagem	Material retido (g)	% retida
0 min (cinza comum)	21,5	43%
5 min	7,5	15%
10 min	0,0	0%

Fonte: O autor (2018).

Portanto pode-se afirmar que, segundo este critério, a cinza volante só pôde ser considerada como material pozolânico, após passar pelo processo de moagem.

4.1.2 Composição química da cinza volante

Conforme análise por florescência de raios X, a tabela 10 mostra a composição química da cinza volante utilizada.

Tabela 10 - Composição química da cinza volante.

Elemento	Teor em massa (%)
SiO_2	48,8
Al_2O_3	30,3
Fe_2O_3	9,5
K_2O	4,2
CaO	2,3
TiO_2	1,8
SO_3	1,2
P_2O_5	0,5
Perda ao fogo	1,4
	100,0

Fonte: O autor (2017).

É possível observar que as concentrações de sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) representam 88,6% da massa do material, estando portanto de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014). Podendo assim ser classificada, segundo este critério, como material pozolânico.

4.1.3 Massa específica das cinzas volantes

A tabela 11 mostra os resultados do ensaio da massa específica para a cinza volante comum e para a cinza volante moída.

Tabela 11 - Massa específica das cinzas volantes.

Ensaio	Cinza moída	Cinza comum
Massa específica (g/cm ³)	2,25	2,17

Fonte: O autor (2017).

Pode-se observar por meio deste ensaio que a cinza volante moída apresentou um valor maior de massa específica. Este resultado era esperado uma vez que, após moagem, o material apresentou partículas com diâmetros menores, portanto é um material mais compacto quando comparado a cinza volante comum.

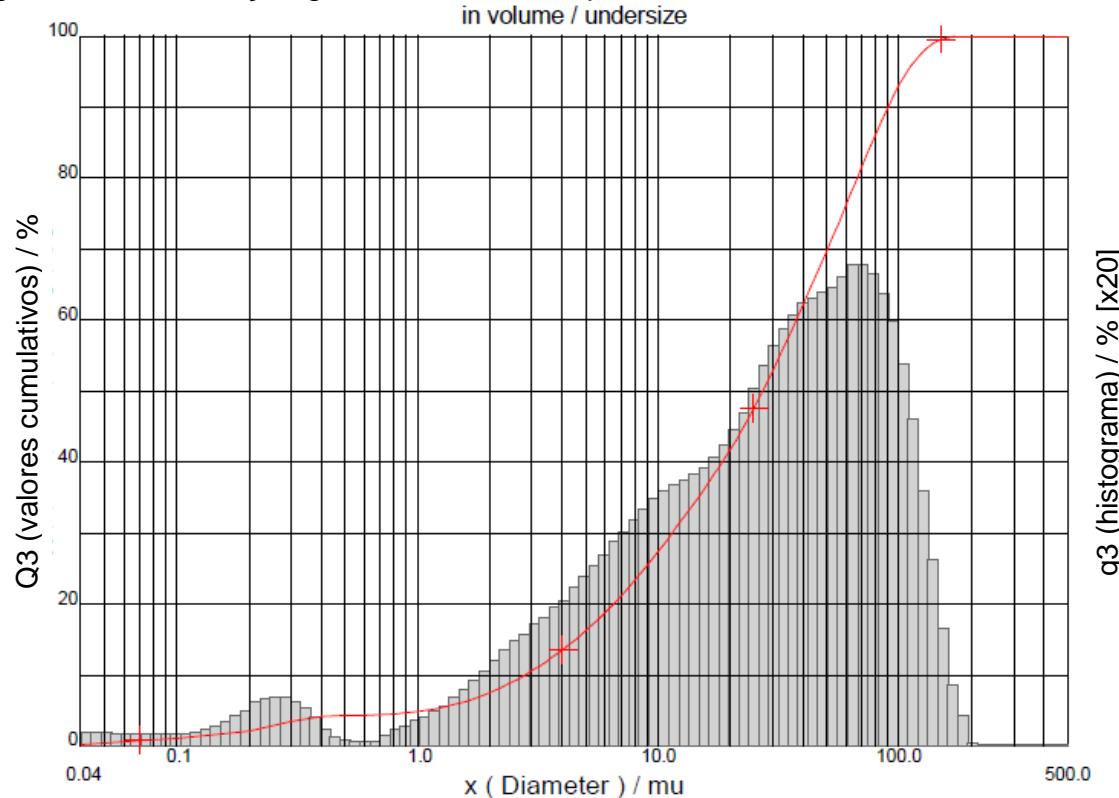
4.1.4 Distribuição granulométrica das cinzas volantes

As curvas de distribuição granulométrica das partículas das cinzas volante comum e moída estão apresentadas nas figura 32 e figura 33.

A figura 32 apresenta a seguinte distribuição de tamanho do diâmetro das partículas para a cinza volante comum: 100% das partículas tem diâmetro menor que 180µm, 90% das partículas possuem dimensão inferior a 90,03 µm, 50% das partículas diâmetro inferior a 27,18 µm e 10% das partículas, inferior a 2,79 µm.

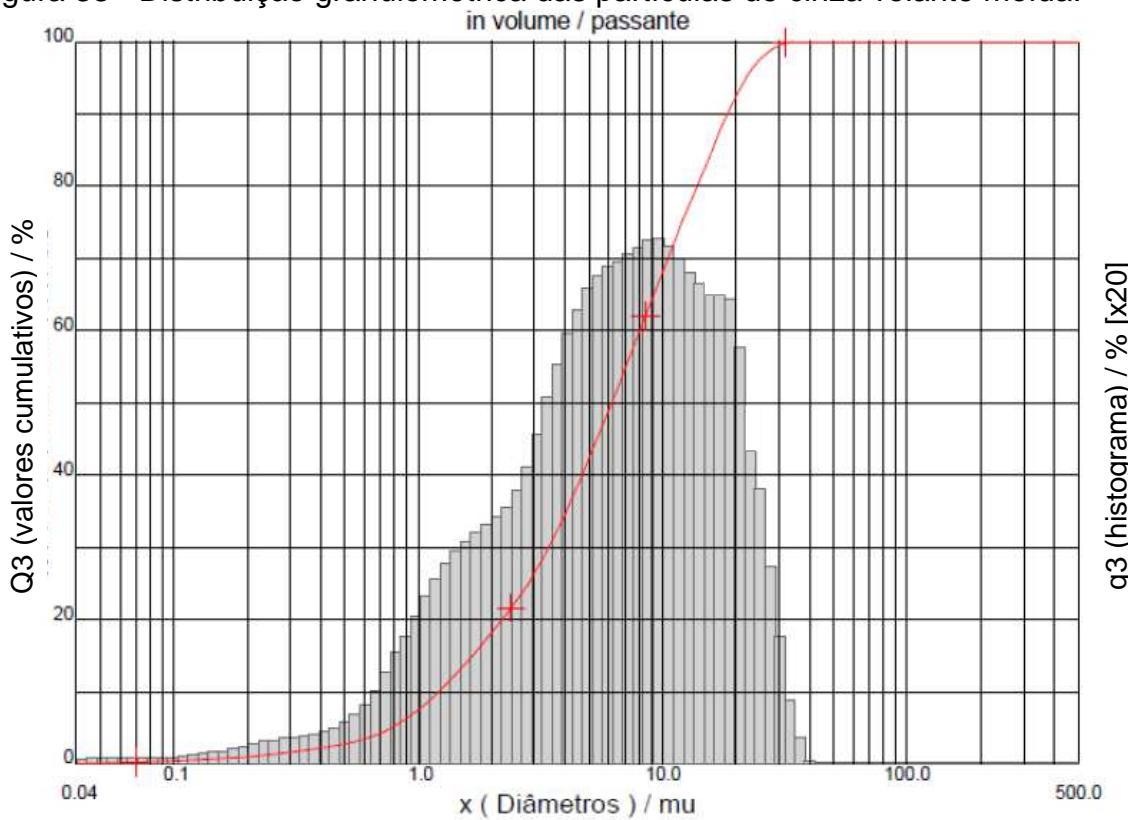
A figura 33 apresenta a seguinte distribuição de tamanho do diâmetro das partículas para a cinza volante moída: 100% das partículas tem diâmetro menor que 41µm, 90% das partículas possuem dimensão inferior a 17,78 µm ,50% das partículas diâmetro inferior a 8,32 µm e 10% das partículas, inferior a 1,45 µm.

Figura 32 - Distribuição granulométrica das partículas de cinza volante comum.



Fonte: O autor (2017).

Figura 33 - Distribuição granulométrica das partículas de cinza volante moída.



Fonte: O autor (2017).

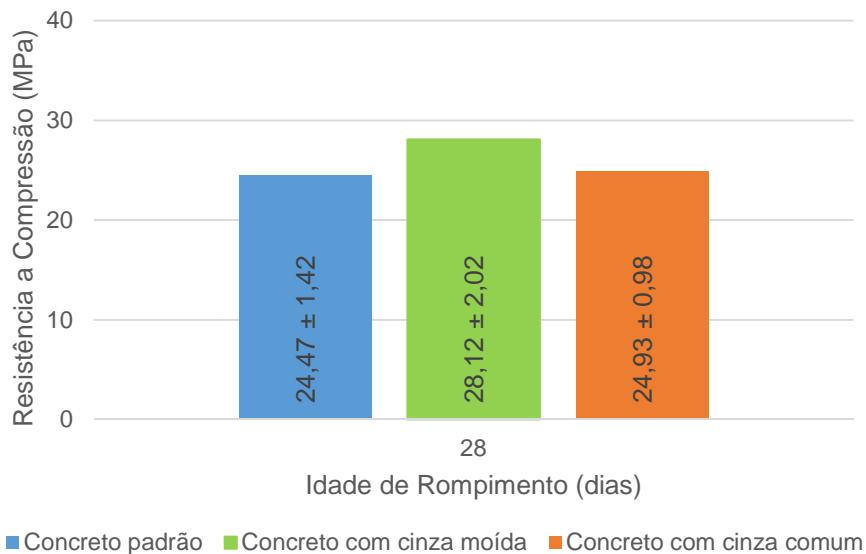
Verifica-se que a moagem diminui consideravelmente o tamanho médio das partículas de cinza volante, conforme observado anteriormente pelo ensaio de peneiramento das cinzas. Isso indica que a cinza volante moída possui maior potencial de reatividade quando comparado a cinza volante comum, esse potencial foi verificado pelo ensaio do índice de desempenho com cimento Portland.

4.1.5 Índice de desempenho com cimento Portland

Com o objetivo de comparar a reatividade entre a cinza volante comum e a cinza volante moída (processada no moinho de bolas por 10 min) foi executado o ensaio de pozolanicidade por determinação do índice de desempenho para ambas as cinzas.

Os resultados deste ensaio estão representados na figura 34.

Figura 34 - Resultado do ensaio do índice de desempenho com cimento Portland.



Fonte: O autor (2016).

Calculou-se então o índice de desempenho para cada cinza volante:

$$\text{Índice de desempenho} = \frac{\text{Resistência à Compressão do concreto com cinza volante}}{\text{Resistência à Compressão do concreto padrão}} \times 100$$

$$\text{Índice de desempenho} = \frac{28,12}{24,47} \times 100 = 114,7\%$$

$$I_{\text{cinza moída}} = \frac{28,12 \times 100}{24,47} = 114,92\%$$

Pode-se verificar que ambas as cinzas volantes têm índice de desempenho superior aos 90%, valor estipulado pela NBR 12653, portanto tanto a cinza volante comum, como a moída, podem ser consideradas como material pozolânico segundo este critério. Entretanto, é importante observar que a cinza volante moída se mostrou mais reativa que a cinza comum, uma vez que atingiu maior índice de desempenho.

Isso acontece pelo fato da cinza volante moída apresentar tamanho médio de partícula menor que a cinza comum e por consequência maior área de superfície específica. Quanto maior for a área de superfície específica, maior será a área de contato para reagir com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento. Portanto a reação pozolânica acontece mais rapidamente quando a cinza é moída.

Além disso, quanto menor for o tamanho médio da partícula de cinza volante, maior é a probabilidade da partícula reagir por completo com o hidróxido de cálcio, evitando assim a existência de partículas de cinza volante parcialmente reagidas. Como consequência, quanto mais partículas reagirem por completo, maior será a resistência à compressão.

4.2 COMPARATIVO ENTRE CINZA VOLANTE COMUM E CINZA VOLANTE MOÍDA

Os resultados abaixo avaliam as propriedades de um concreto com substituição parcial de cimento Portland por cinza volante. Foram testados e comparados concretos com substituição de cinza volante comum por cimento Portland, assim como com substituição de cinza volante moída.

Para tanto foram elaborados três traços iguais de concreto, porém o traço A com 100% de cimento Portland, o traço B utilizando 25% de cinza volante comum em substituição ao cimento Portland e o traço C utilizando 25% de cinza volante moída em substituição ao cimento Portland.

4.2.1 Ensaio de abatimento do tronco cone e manutenção da trabalhabilidade

As leituras iniciais do abatimento foram feitas imediatamente após as misturas dos concretos em betoneira. Após a primeira leitura o material foi devolvido a betoneira, misturado e deixado em repouso até a execução do próximo ensaio. O ensaio foi repetido para 15 e 30 min.

A tabela 12 apresenta os valores medidos.

Tabela 12 - Leituras do abatimento ao longo do tempo, em mm.

Tempo de leitura	Concreto padrão	Concreto com cinza comum	Concreto com cinza moída
Leitura inicial	160	190	80
Após 15 min	70	150	40
Após 30 min	30	120	30
Perda de abatimento	81%	37%	62%

Fonte: O autor (2016).

Pode-se observar que a utilização de cinza volante comum melhora as propriedades reológicas do concreto, pois seu formato esférico e regular reduz o atrito interno entre os agregados e a pasta, aumentando assim a fluidez do concreto, 160 mm no caso do traço padrão e 190 mm no traço com cinza comum.

Porém, no caso da cinza moída, observa-se uma menor fluidez de 80 mm. Isso acontece pelo fato de que a cinza, após moída, apresentar maior área específica superficial, o que aumenta a adsorção de água, deixando menos água livre para dar fluidez ao concreto.

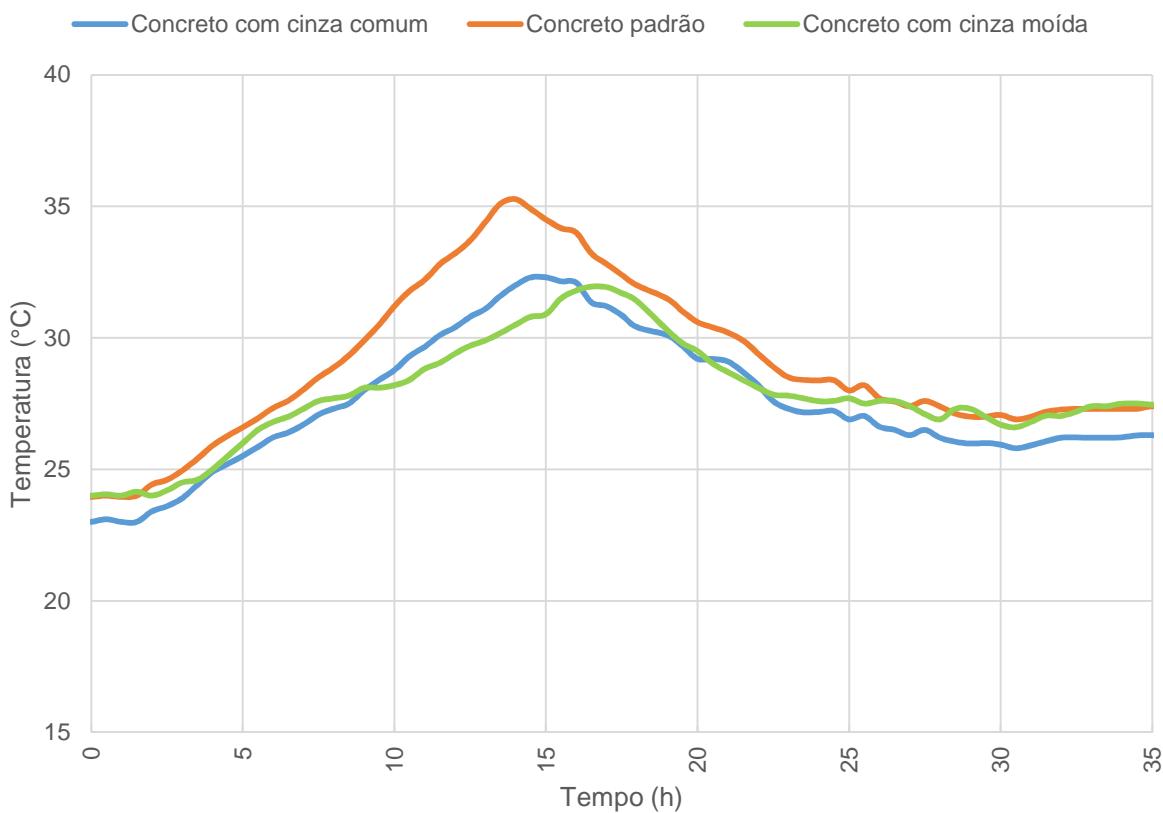
Mesmo assim, tanto a utilização de cinza volante comum como a cinza volante moída diminuíram a perda de abatimento do concreto, 37% e 62% respectivamente, quando comparados ao traço padrão, onde a perda de abatimento foi de 81%.

Quanto menor for a perda de abatimento, maior será a manutenção da trabalhabilidade do concreto, ou em outras palavras, o concreto se mantém trabalhável por mais tempo. Essa é uma propriedade importante em concretos usinados, onde muitas vezes o local da obra (descarga) é distante da central.

4.2.2 Calor de hidratação

A figura 35 mostra a variação da temperatura do concreto ao longo do tempo durante seu processo de cura.

Figura 35 - Gráfico da temperatura ao longo do processo de cura do concreto.



Fonte: O autor (2016).

É possível observar que, tanto a cinza volante comum, como a cinza moída ajudaram a reduzir o calor de hidratação do concreto durante seu processo de cura. O pico máximo de temperatura para o concreto padrão foi de 35,27°C, 32,30°C para o concreto com cinza comum e 32,10 °C para o concreto com cinza moída, ou seja, uma redução 8,42% e 8,99% respectivamente.

Como existe menos cimento para hidratar com água, o calor de hidratação tende a ser menor. Isso traz vantagens importantes, pois diminui a perda de água por evaporação que, por consequência, diminui a retração durante a cura. O que significa redução das fissuras de retração.

Pode-se observar um pequeno retardo no tempo de início pega dos concretos com cinza volante, assim como, uma diferença nos tempos de fim de pega para as três misturas.

Portanto pode-se afirmar que a utilização de cinza volante contribui para um concreto de maior durabilidade, uma vez que ajuda a evitar o surgimento de fissuras durante o processo de retração. Dificultando assim a migração de agentes agressivos para dentro do concreto.

Deve ser observada que essa redução foi proporcional ao teor de cinza volante utilizado em substituição ao cimento Portland, portanto para maiores teores cinza é possível conseguir reduções ainda maiores de temperatura.

4.2.3 Massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos

A tabela 13 apresenta os valores dos ensaios de índice de vazios, massa específica e absorção de água para os concretos padrão, com cinza moída e cinza comum.

Tabela 13 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água.

Ensaio	Concreto padrão	Concreto com cinza moída	Concreto com cinza comum
Índice de vazios (%)	10,34	9,16	9,52
Massa específica (g/cm ³)	2,27	2,13	2,12
Absorção de água (%)	4,55	4,04	4,25

Fonte: O autor (2016).

A reação pozolânica entre a cinza volante e o CH, presente principalmente na zona de transição, torna a matriz mais compacta e impermeável, pois diminui o índice de vazios dentro da pasta, o que diminui também a absorção de água do concreto. Isso contribui para uma menor permeabilidade e, por consequência, maior durabilidade do concreto, uma vez que dificulta a entrada de agentes agressivos no mesmo.

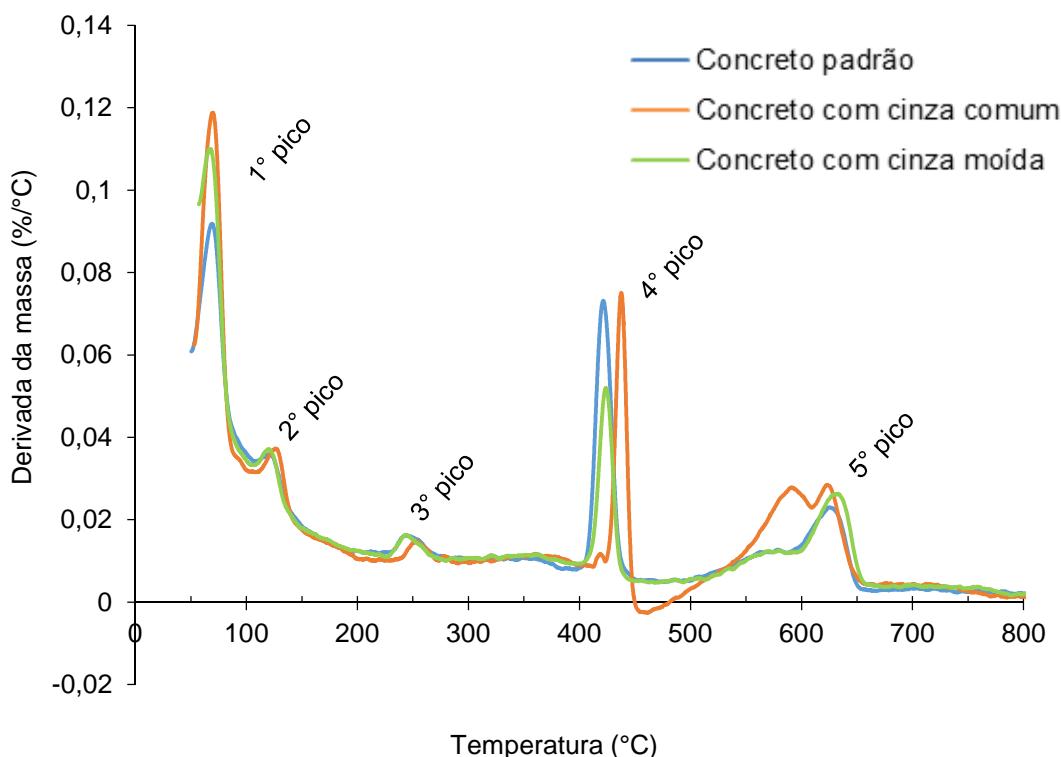
Pode-se observar também que o concreto ficou mais leve, algo que já era esperado, uma vez que a densidade da cinza volante é menor do que a densidade do cimento CPV-ARI.

É importante observar que, quanto mais finamente moída for a cinza volante, mais refinada se torna a matriz do concreto. Isso pode ser visto quando comparados os resultados do ensaio, onde o índice de vazios e a absorção de água são maiores no concreto com cinza volante comum do que no concreto com cinza moída.

4.2.4 Resultados DTG e TGA

A figura 36 mostra os resultados do ensaio DTG com os picos endotérmicos característicos deste ensaio.

Figura 36 - Resultados do ensaio DTG.



Fonte: O autor (2016).

O resultado do ensaio de termogravimetria apresenta 5 picos endotérmicos importantes de acordo com Serry *et al.* (1984).

O primeiro pico acontece entre 70 e 100 °C e representa a perda da água adsorvida no concreto. É possível reparar que tanto no concreto com cinza volante comum como no concreto com cinza moída este pico endotérmico é maior que no concreto padrão.

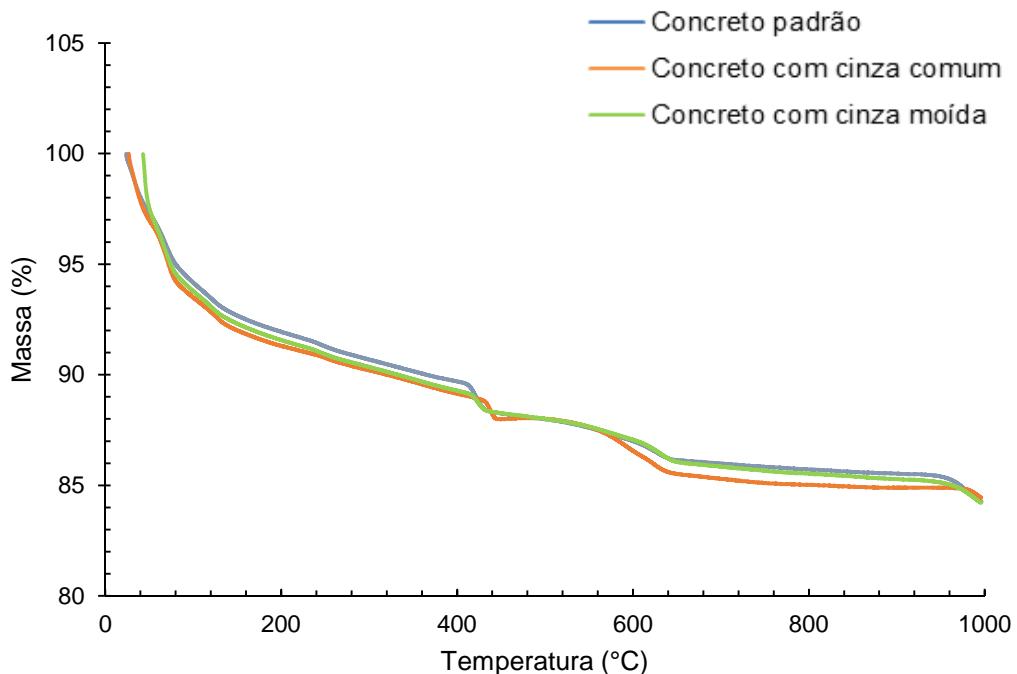
O segundo pico endotérmico acontece entre 100 e 150 °C e indica a presença do C-S-H.

O terceiro pico (220 a 280 °C) é devido a presença do hidrogranada, ou aluminato tricálcico hexahidratado, produto proveniente das reações de hidratação do C₃A.

O quarto pico, talvez o mais importante, acontece entre 400 e 450 °C e indica a decomposição do hidróxido de cálcio. É importante reparar que este pico é menor no concreto com cinza moída, isso mostra que esta cinza consumiu mais hidróxido de cálcio durante sua reação pozolânica do que os demais concretos. Isso se deve ao fato da cinza moída ser mais reativa que a cinza comum conforme já explicado anteriormente.

O quinto e último pico endotérmico acontece entre 600 e 700 °C e mostra a decomposição do CaCO₃ (carbonato de cálcio).

Figura 37 - Resultados do ensaio TGA.



Fonte: O autor (2016).

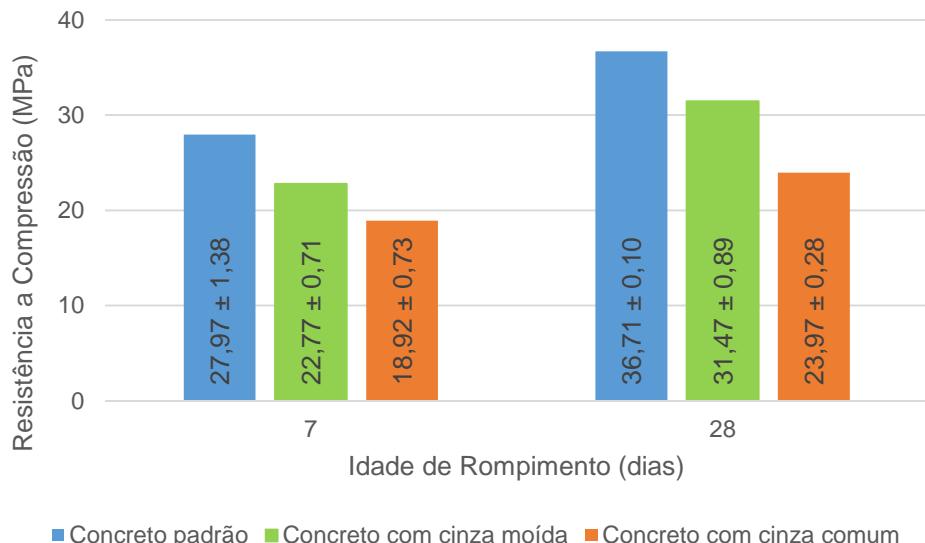
Já a figura 37 mostra os resultados do ensaio TGA. Este ensaio é complementar ao DTG e mostra as perdas de massa dos compostos químicos correspondente aos picos endotérmicos indicados do DTG.

Através do resultado do TGA foi possível calcular as perdas de massa para as três misturas. A perda de massa, correspondente ao CH, que aconteceu entre 400 e 450°C foi maior para o concreto padrão, 1,45%. Para o concreto com cinza volante comum a perda de massa foi de 1,16%, já para o concreto com CV moída foi de 1,02%. Isso mostra que o concreto padrão possui mais CH do que os demais concretos pozolânicos. É possível ainda perceber que o concreto com cinza volante moída possui a menor quantidade de CH, ou seja, a cinza volante se tornou mais reativa após sua moagem.

4.2.5 Resistência à compressão

A figura 38 apresenta os resultados do ensaio de resistência mecânica à compressão dos corpos de prova de concreto para as idades de controle de 7 e 28 dias.

Figura 38 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: O autor (2016).

Neste ensaio, podemos observar que ambos os concretos pozolânicos apresentaram resistência à compressão inferior ao concreto padrão. Para a idade de 28 dias os concretos com cinza moída e cinza comum apresentaram resistências menores que a resistência à compressão do concreto padrão, 18,6% e 32,4% menores, respectivamente. Porém vale observar que essa diferença diminui entre as

idades de 7 e 28 dias. No caso do concreto com cinza moída, por exemplo, essa diferença reduziu para 14,3%.

Esta evolução é uma tendência em concretos pozolânicos, uma vez que a reação pozolânica continua acontecendo mesmo após o fim da reação de hidratação do cimento. Portanto, essa diferença tende a diminuir ainda mais com idades mais avançadas.

Vale ressaltar também, a grande diferença entre as resistências mecânicas à compressão do concreto com cinza volante moída e o concreto com cinza comum. Isso comprova o que já foi mostrado nos demais ensaios, sobre a capacidade de reação da cinza moída quando comparada a cinza comum.

Desta forma, decidiu-se fazer a moagem de toda cinza volante a ser utilizada para os demais ensaios desta pesquisa.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PROJETO FATORIAL

Com o objetivo de verificar o efeito dos fatores nas propriedades do concreto, foi feito um estudo estatístico por meio de análise de variância, análise de regressão e superfície de resposta. A tabela 14 apresenta os valores médios para a resistência à compressão, das 9 misturas do planejamento fatorial e suas réplicas, para 28 e 115 dias de cura, enquanto que a tabela 15 apresenta os valores do abatimento medido no ensaio *slump test* para as 9 misturas e suas réplicas.

Tabela 14 - Valores médios para resistência à compressão RC28 e RC115 dias.

	Mistura	Fator a/c	Cinza volante (%)	RC28 (MPa)	RC115 (MPa)
1ª Moldagem	1	0,45	30	40,75 ± 5,24	47,08 ± 5,39
	2	0,45	50	28,93 ± 4,43	35,70 ± 4,00
	3	0,45	70	20,68 ± 1,51	29,42 ± 1,90
	4	0,50	30	30,58 ± 1,09	40,41 ± 3,53
	5	0,50	50	29,14 ± 2,40	37,84 ± 2,36
	6	0,50	70	14,55 ± 1,64	20,89 ± 0,54
	7	0,55	30	25,29 ± 2,99	35,47 ± 5,62
	8	0,55	50	22,38 ± 1,44	34,40 ± 2,01
	9	0,55	70	17,35 ± 1,87	23,71 ± 2,46
Réplica	1	0,45	30	34,45 ± 2,49	46,19 ± 5,95
	2	0,45	50	28,23 ± 3,39	37,75 ± 2,17
	3	0,45	70	19,77 ± 1,65	25,35 ± 2,31
	4	0,50	30	33,47 ± 3,62	46,37 ± 3,27
	5	0,50	50	27,78 ± 2,88	37,70 ± 4,49
	6	0,50	70	15,32 ± 1,31	22,42 ± 2,14
	7	0,55	30	27,90 ± 0,73	35,69 ± 3,64
	8	0,55	50	23,42 ± 1,19	36,58 ± 2,75
	9	0,55	70	15,93 ± 0,21	23,34 ± 1,80

Fonte: O autor (2018).

Tabela 15 - Valores do abatimento (*slump test*).

	Mistura	Fator a/c	Cinza volante (%)	Abatimento (mm)
1ª Moldagem	1	0,45	30	120
	2	0,45	50	75
	3	0,45	70	60
	4	0,50	30	175
	5	0,50	50	110
	6	0,50	70	75
	7	0,55	30	200
	8	0,55	50	180
	9	0,55	70	100
Réplica	1	0,45	30	80
	2	0,45	50	100
	3	0,45	70	30
	4	0,50	30	180
	5	0,50	50	130
	6	0,50	70	70
	7	0,55	30	205
	8	0,55	50	190
	9	0,55	70	150

Fonte: O autor (2018).

4.3.1 Resistência à compressão aos 28 dias

A tabela 16 apresenta a análise de variância para as resistências à compressão para 28 dias de cura dos concretos, considerando apenas os valores estatisticamente significativos, admitindo um nível de significância, α , de 7% para o teste de hipóteses, onde no caso de $p \leq \alpha$ a hipótese nula deve ser rejeitada.

A proporção de variabilidade obtida na análise de variância ($R^2 = 0,934$) é elevada, isso significa que mais de 93% da variabilidade dos resultados dependem dos fatores estudados, ou seja, não existe outro fator externo que possa ter afetado significativamente os resultados apresentados. Pode-se verificar ainda na tabela 16 que a variabilidade entre as réplicas não apresentou falta de ajuste, pois $p (0,1726) > \alpha (0,07)$, isso significa que os valores medidos para a resistência à compressão das réplicas são aceitáveis.

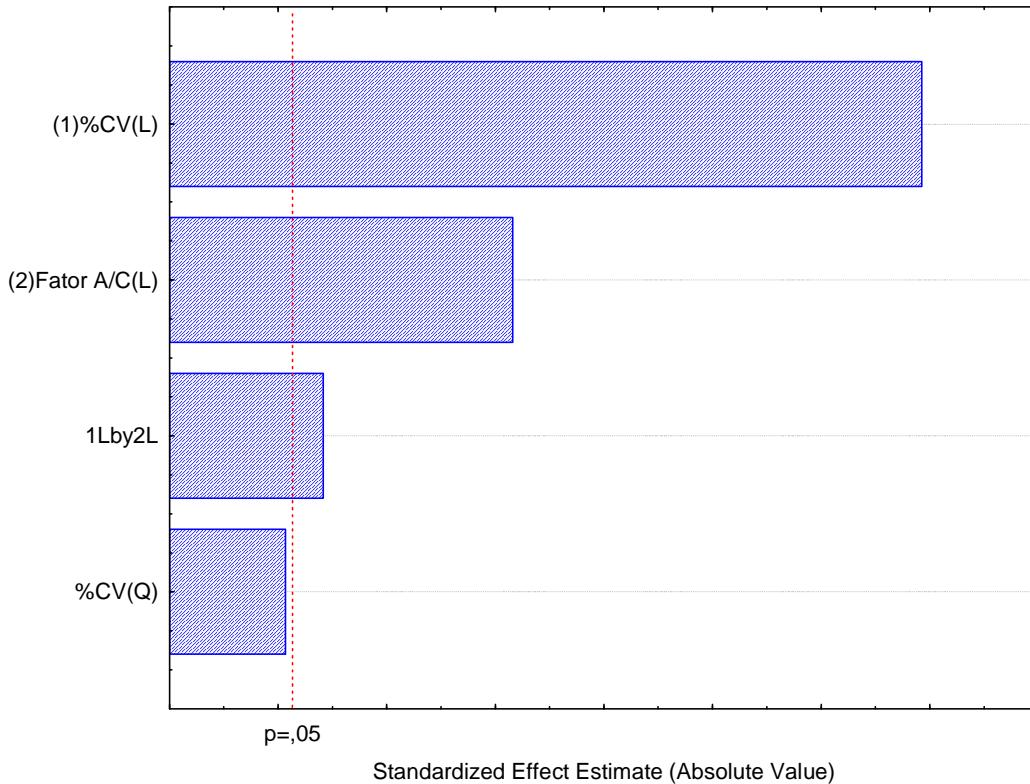
Tabela 16 - Análise de variância da resistência à compressão com 28 dias de cura com os efeitos estatisticamente significativos.

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
%CV (L)	657,7121	1	657,7121	191,8373	0,000000
%CV (Q)	15,6288	1	15,6288	4,5585	0,061512
Fator a/c (L)	136,9576	1	136,9576	39,9469	0,000138
1L by 2L	27,5282	1	27,5282	8,0293	0,019607
Falta de Ajuste	27,9204	4	6,9801	2,0359	0,172674
Erro	30,8564	9	3,4285		
Total	896,6036	17			

Fonte: O autor (2018).

Ainda por meio da tabela 16, é possível verificar que, o fator %CV (porcentagem de cinza volante) é o fator que mais impacta na resistência à compressão, pois apresenta o menor valor de p e o maior valor na soma dos quadrados se comparado aos outros fatores. O mesmo pode ser verificado através do diagrama de Pareto (figura 39), onde o fator %CV se destaca dos demais fatores.

Figura 39 - Diagrama de Pareto para 28 dias.



Fonte: O autor (2018).

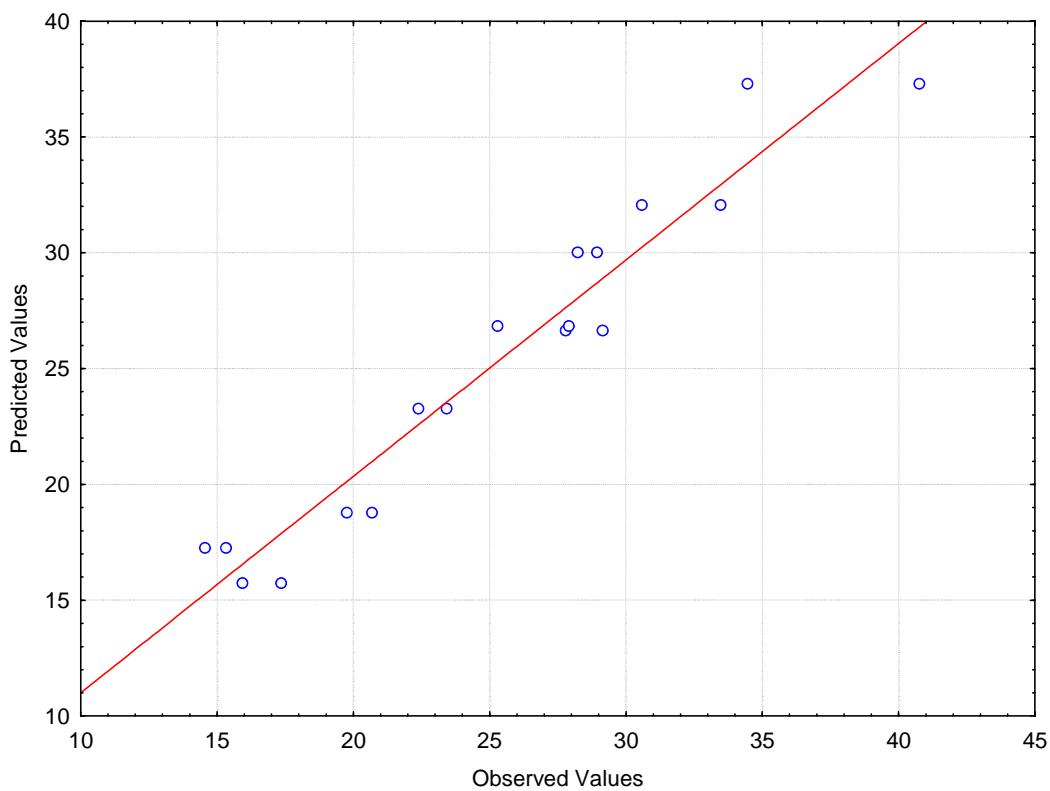
A partir dos resultados da análise da variância foi proposto um modelo de regressão para representar o efeito dos fatores estudados na resistência à compressão dos concretos, representado pela equação 17.

$$Y = 112,959 - 0,804X_1 - 0,005X_1^2 - 160,317X_2 + 1,855X_1X_2 \quad (17)$$

Onde, Y corresponde a resistência à compressão para 28 dias em MPa; X_1 é porcentagem de cinza volante em substituição ao cimento Portland e X_2 é a relação água-cimento (a/c) da mistura.

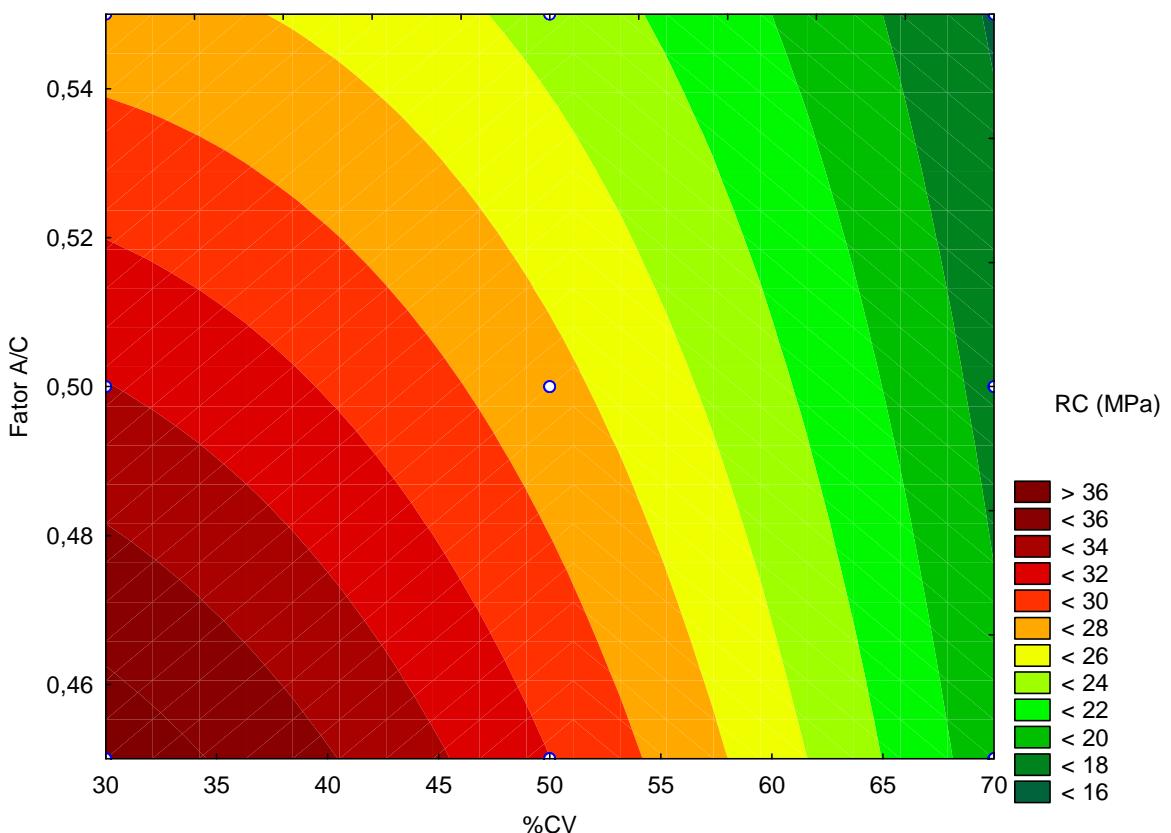
Para avaliação da adequação do modelo de regressão proposto através da equação 17 foi necessário analisar também os resíduos a respeito das distribuições quanto à normalidade e aleatoriedade. De acordo com a figura 40, pode-se afirmar que o modelo é adequado, uma vez que as diferenças entre os valores experimentais e os valores preditos pela equação do modelo são mínimas.

Figura 40 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.



Fonte: O autor (2018).

Figura 41 - Gráfico de contorno da RC28 em função dos fatores %CV e fator a/c.



Fonte: O autor (2018).

Para uma melhor visualização dos efeitos dos fatores (%CV e a/c) na resistência à compressão dos concretos aos 28 dias foi gerado um gráfico de contorno, representado na figura 41.

Com o objetivo de validar o modelo calculado selecionou-se uma nova mistura, chamada V1, dentro do intervalo de misturas, considerando uma porcentagem de cinza volante de 60 e fator a/c de 0,475. Os valores medidos da resistência à compressão aos 28 dias para V1 foram comparados com os valores preditos pelo modelo. Estes resultados mostram que o modelo representa satisfatoriamente os resultados experimentais, uma vez que a diferença entre a média dos valores medidos no ensaio e o valor predito pelo modelo é de apenas 2,8% (tabela 17)

Tabela 17 - Teste para validação e valores preditos para RC28.

Fator	Coeficiente de Regressão	Valor	Valor do Coeficiente
Constante	112,959	1	112,96
%CV (L)	-0,804	60	-48,24
%CV (Q)	-0,005	3600	-18,00
Fator a/c (L)	-160,317	0,475	-76,15
1L by 2L	1,855	28,5	52,87
Valor predito (MPa)			23,44
Média dos valores medidos para V1 (MPa)			22,78 ± 1,09

Fonte: O autor (2018).

4.3.2 Resistência à compressão aos 115 dias

A tabela 18 apresenta a análise de variância para as resistências à compressão para 115 dias de cura dos concretos, considerando apenas os valores estatisticamente significativos, admitindo um nível de significância, α , de 3% para o teste de hipóteses, onde no caso de $p \leq \alpha$ a hipótese nula deve ser rejeitada.

A proporção de variabilidade obtida na análise de variância ($R^2 = 0,926$) é elevada, isso significa que mais de 92% da variabilidade dos resultados dependem dos fatores estudados, ou seja, não existe outro fator externo que possa ter afetado significativamente os resultados apresentados. Pode-se verificar ainda na tabela 18 que a variabilidade entre as réplicas não apresentou falta de ajuste, pois $p (0,0419) >$

α (0,03), isso significa que os valores medidos para a resistência à compressão das réplicas são aceitáveis.

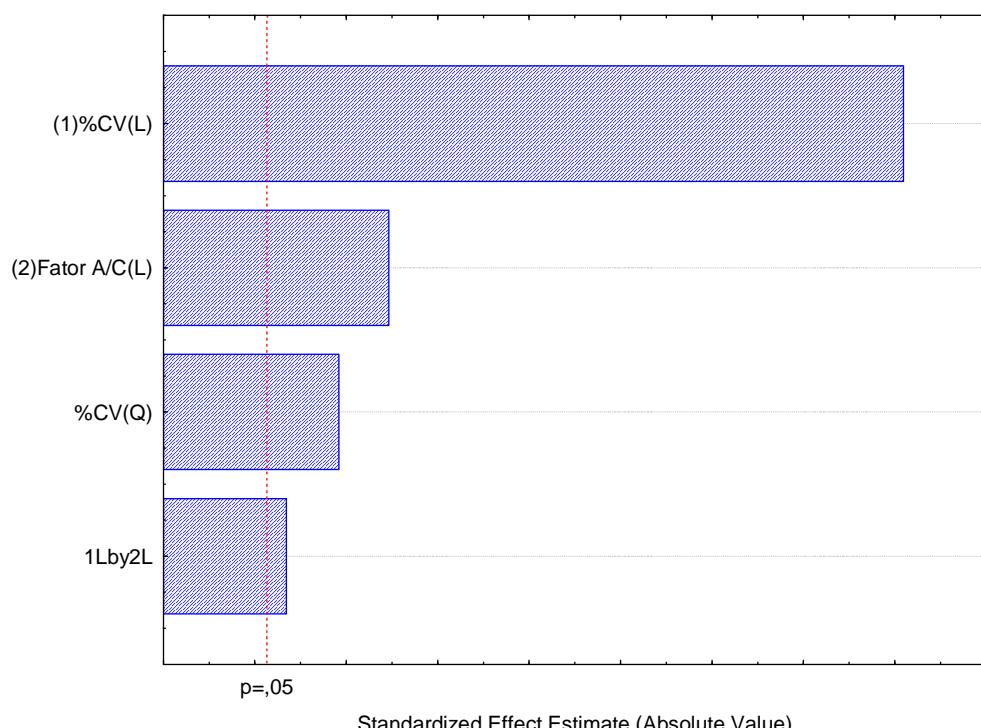
Ainda por meio da tabela 18, é possível verificar que, o fator %CV (porcentagem de cinza volante) é o fator que mais impacta na resistência à compressão, pois apresenta o menor valor de p e o maior valor na soma dos quadrados se comparado aos outros fatores.

Tabela 18 - Análise de variância da resistência à compressão com 115 dias de cura com os efeitos estatisticamente significativos.

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
%CV (L)	937,747	1	937,7472	262,1875	0,000000
%CV (Q)	52,804	1	52,8044	14,7638	0,003952
Fator a/c (L)	86,941	1	86,9408	24,3080	0,000813
1L by 2L	25,884	1	25,8840	7,2370	0,024790
Falta de Ajuste	55,698	4	13,9245	3,8932	0,041948
Erro	32,190	9	3,5766		
Total	1191,264	17			

Fonte: O autor (2018).

Figura 42 - Diagrama de Pareto para 115 dias.



Fonte: O autor (2018).

O mesmo pode ser verificado através do diagrama de Pareto (figura 42), onde o fator %CV se destaca dos demais fatores.

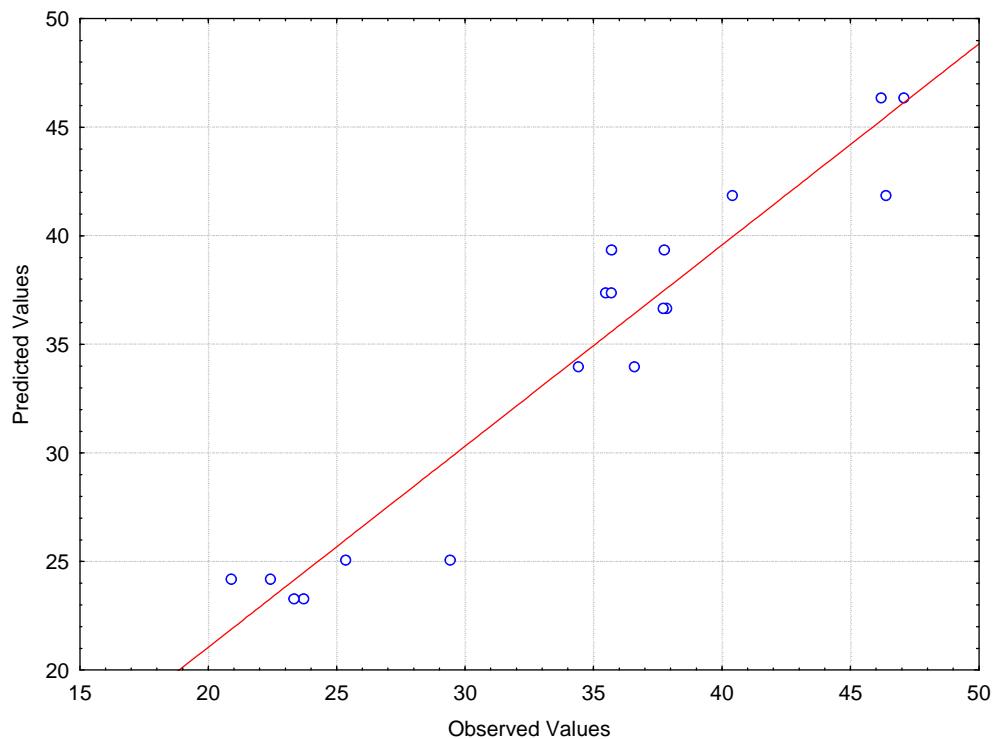
A partir dos resultados da análise da variância foi proposto um modelo de regressão para representar o efeito dos fatores estudados na resistência à compressão dos concretos, representado pela equação 18.

$$Y = 107,939 - 0,433X_1 - 0,009X_1^2 - 143,771X_2 + 1,799X_1X_2 \quad (18)$$

Onde, Y corresponde a resistência à compressão para 115 dias em MPa; X_1 é porcentagem de cinza volante em substituição ao cimento Portland e X_2 é a relação água-cimento (a/c) da mistura.

Para avaliação da adequação do modelo de regressão proposto através da equação 18 foi necessário analisar também os resíduos a respeito das distribuições quanto à normalidade e aleatoriedade. De acordo com a figura 43, pode-se afirmar que o modelo é adequado, uma vez que as diferenças entre os valores experimentais e os valores preditos pela equação do modelo são mínimas.

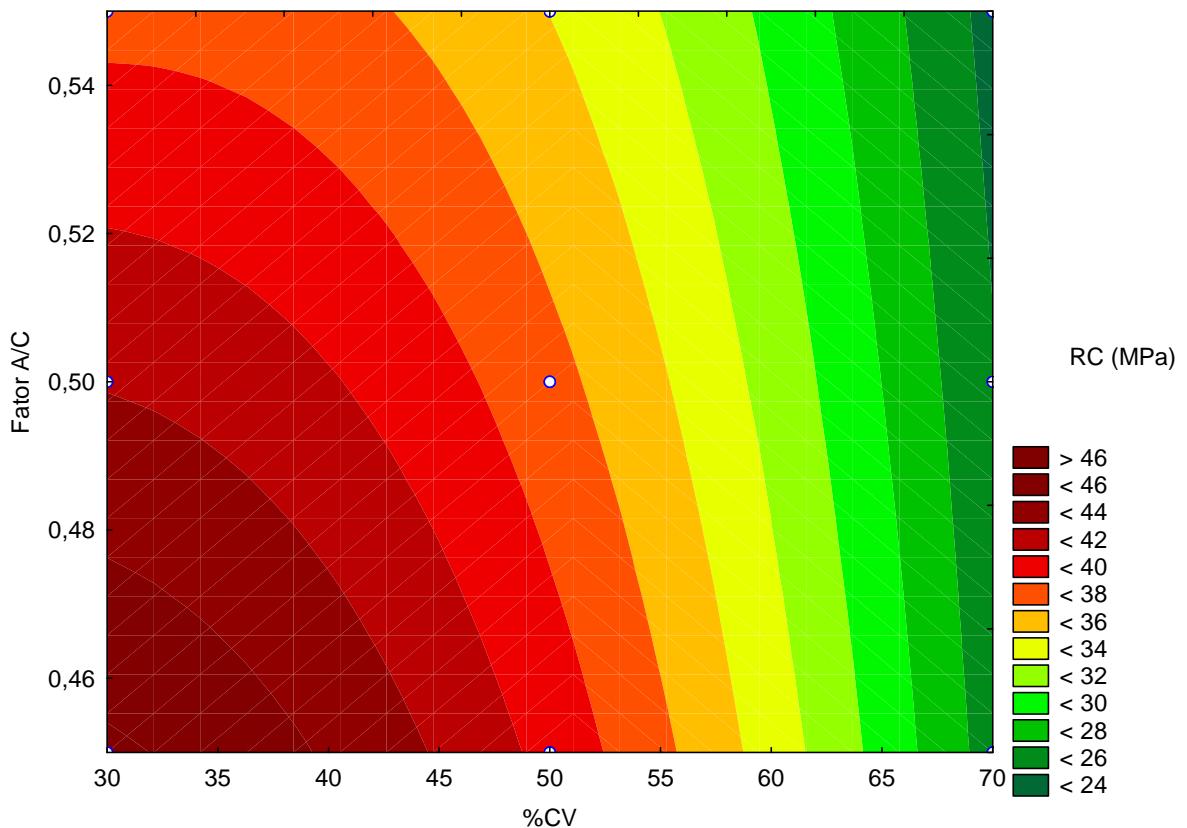
Figura 43 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.



Fonte: O autor (2018).

Para uma melhor visualização dos efeitos dos fatores (%CV e a/c) na resistência à compressão dos concretos aos 115 dias foi gerado um gráfico de contorno, representado na figura 44.

Figura 44 - Gráfico de contorno da RC115 em função dos fatores %CV e fator a/c.



Fonte: O autor (2018).

A Tabela 19 mostra o resultado do teste de validação para a mistura V1. Os valores medidos da RC115 para V1 foram comparados com os valores preditos pelo modelo. Estes resultados mostram que o modelo representa satisfatoriamente os resultados experimentais, uma vez que a diferença entre a média dos valores medidos no ensaio e o valor predito pelo modelo é de apenas 2,6%.

Tabela 19 - Teste para validação, medidas e valores preditos para RC115.

Fator	Coeficiente de Regressão	Valor	Valor do Coeficiente
Constante	107,939	1	107,94
%CV (L)	-0,433	60	-25,98
%CV (Q)	-0,009	3600	-32,40
Fator a/c (L)	-143,771	0,475	-68,29
1L by 2L	1,799	28,5	51,27
Valor predito (MPa)			32,54
Média dos valores medidos para V1 (MPa)			33,38 ± 3,99

Fonte: O autor (2018).

4.3.3 Abatimento do tronco de cone (*Slump test*)

A tabela 20 apresenta a análise de variância para os valores de abatimento medidos no *slump test*, considerando apenas os valores estatisticamente significativos, admitindo um nível de significância, α , de 1% para o teste de hipóteses, onde no caso de $p \leq \alpha$ a hipótese nula deve ser rejeitada.

A proporção de variabilidade obtida na análise de variância ($R^2 = 0,895$) é elevada, isso significa que mais de 89% da variabilidade dos resultados dependem dos fatores estudados, ou seja, não existe outro fator externo que possa ter afetado significativamente os resultados apresentados. Pode-se verificar ainda na tabela 20 que a variabilidade entre as réplicas não apresentou falta de ajuste, pois $p (0,4493) > \alpha (0,01)$, isso significa que os valores de abatimento, medido nas réplicas, são aceitáveis.

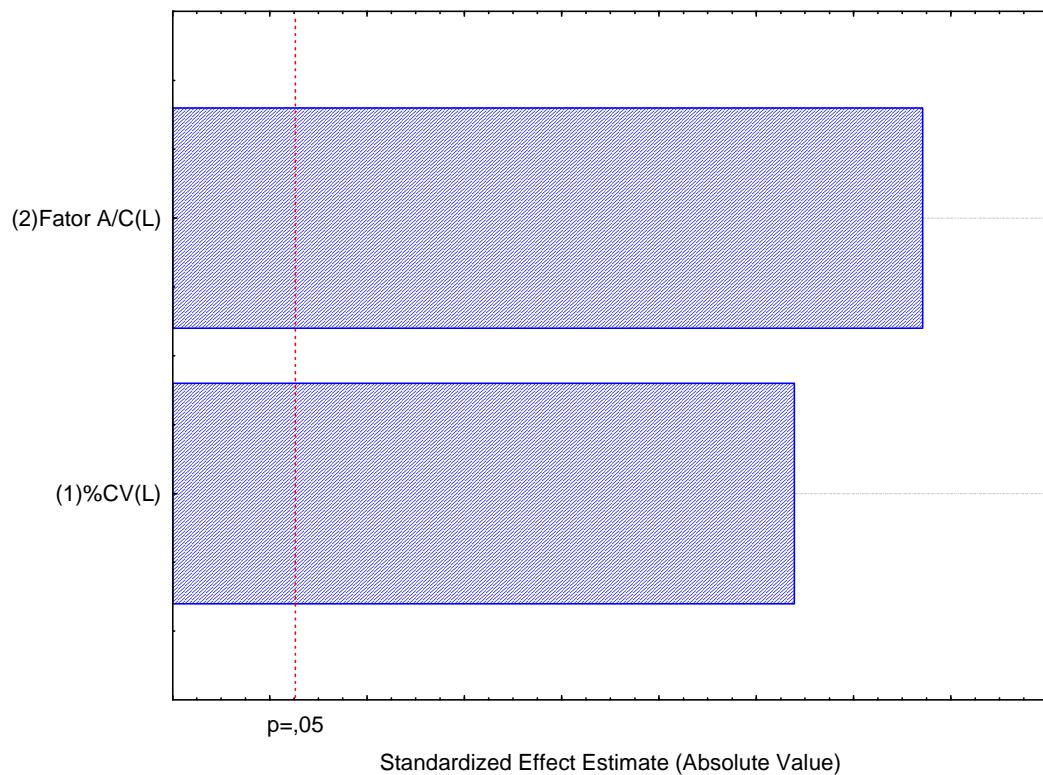
Tabela 20 - Análise de variância para o abatimento (*slump*) com os efeitos estatisticamente significativos.

Fator	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F	p
%CV (L)	18802,08	1	18802,08	54,58669	0,000042
Fator a/c (L)	26133,33	1	26133,33	75,87097	0,000011
Falta de Ajuste	2192,36	6	365,39	1,06082	0,449373
Erro	3100,00	9	344,44		
Total	50227,78	17			

Fonte: O autor (2018).

Neste caso é possível verificar que os fatores impactam de forma quase equivalente no valor do abatimento, pois apresentam valores de p e soma dos quadrados muito próximos. Esse equilíbrio pode ser verificado também através do diagrama de Pareto (figura 45).

Figura 45 - Diagrama de Pareto para o abatimento.



Fonte: O autor (2018).

A partir dos resultados da análise da variância foi proposto um modelo de regressão para representar o efeito dos fatores estudados nos ensaios de abatimento de tronco de cone para os concretos, representado pela equação 19.

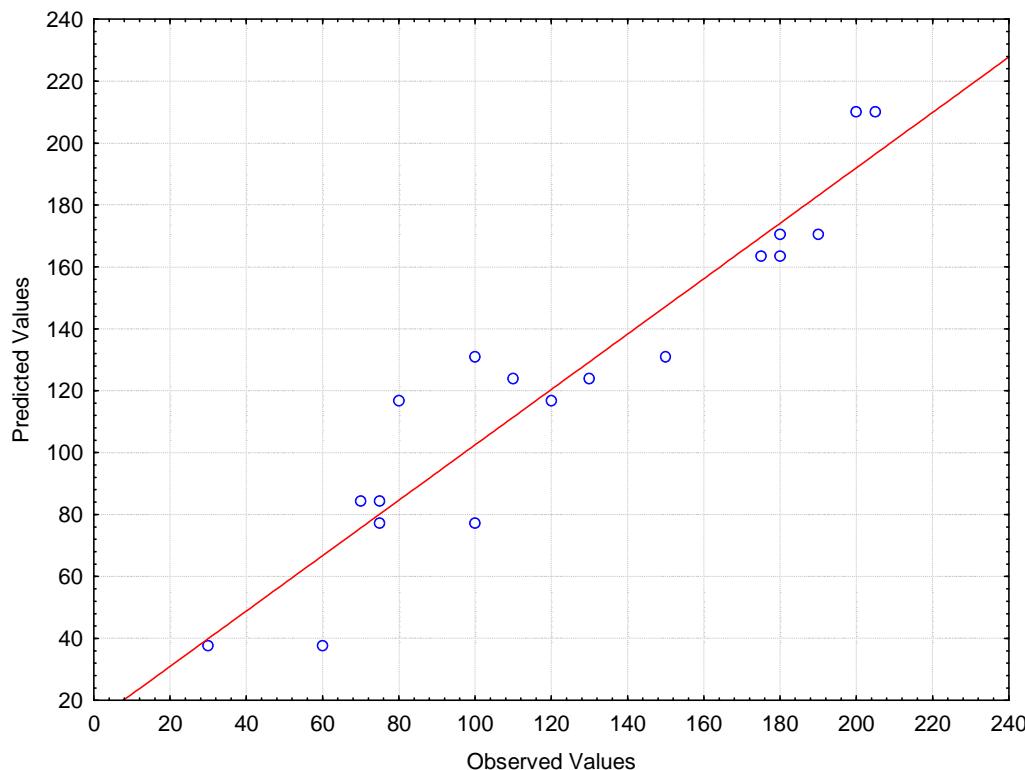
$$Y = -243,819 - 1,979X_1 + 933,333X_2 \quad (19)$$

Onde, Y corresponde o valor do abatimento (*slump*) medido em mm; X_1 é porcentagem de cinza volante em substituição ao cimento Portland e X_2 é a relação água-cimento (a/c) da mistura.

Para avaliação da adequação do modelo de regressão proposto através da equação 19 foi necessário analisar também os resíduos a respeito das distribuições

quanto à normalidade e aleatoriedade. De acordo com a figura 46, pode-se afirmar que o modelo é adequado, uma vez que as diferenças entre os valores experimentais e os valores preditos pela equação do modelo são mínimas.

Figura 46 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.

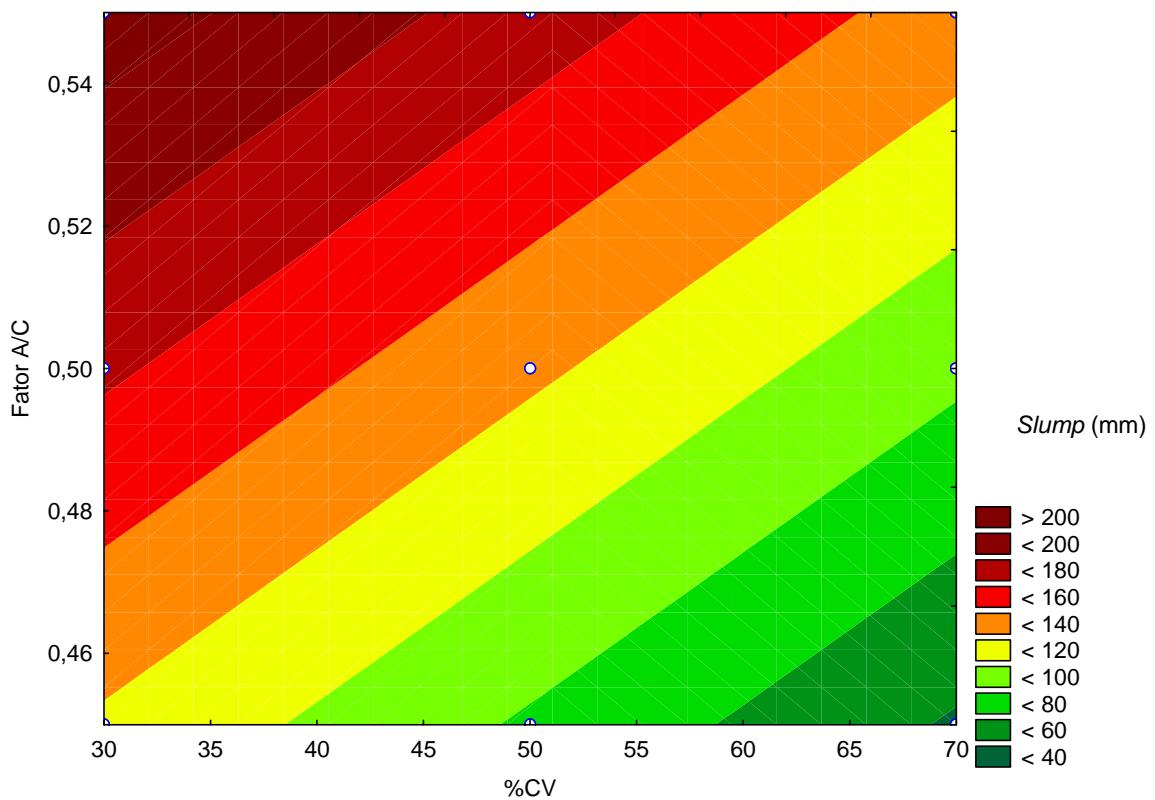


Fonte: O autor (2018).

Para uma melhor visualização da influência dos fatores (%CV e a/c) no valor do abatimento foi gerado um gráfico de contorno, representado na figura 47.

A Tabela 21 mostra os valores do teste de validação. O valor do abatimento medido para V1 foi comparado com o valor predito pelo modelo. Este resultado mostra que o modelo representa satisfatoriamente os resultados experimentais, uma vez que a diferença o valor medido no ensaio e o valor predito pelo modelo é de 11%.

Figura 47 - Gráfico de contorno do abatimento (*slump*) em função dos fatores %CV e fator a/c.



Fonte: O autor (2018).

Tabela 21 - Teste para validação, medidas e valores preditos para o abatimento.

Fator	Coeficiente de Regressão	Valor	Valor do Coeficiente
Constante	-243,819	1	-243,819
%CV (L)	-1,979	60	-118,740
Fator a/c (L)	933,333	0,475	443,333
Valor predito (mm)		81	
Valor medido para V1 (mm)		90	

Fonte: O autor (2018).

4.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DA MISTURA COM ALTO TEOR DE CINZA VOLANTE

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios para a mistura com alto teor de cinza volante, V1, com 60% de cinza volante em substituição ao cimento

Portland e relação a/c de 0,475, e os comparativos com a mistura padrão, VP, utilizando 100% de cimento Portland.

4.4.1 Teste do abatimento do tronco cone (*slump test*)

A tabela 22 apresenta os valores medidos no ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*) para as mistura V1 e VP.

Tabela 22 - Leitura do abatimento (*slump test*).

Corpo de prova	Abatimento (mm)
VP	130
V1	90

Fonte: O autor (2018).

Pode-se observar que a utilização de 60% de cinza volante proporcionou menor fluidez ao concreto. Isso acontece pelo fato da cinza volante moída apresentar maior área específica superficial, o que aumenta a adsorção de água, deixando menos água livre para dar fluidez ao concreto. Este efeito já foi verificado e explicado anteriormente nesta pesquisa.

4.4.2 Calor de hidratação

A figura 48 mostra a variação da temperatura devido ao calor de hidratação do cimento ao longo do tempo durante seu processo de cura, tanto para a mistura VP como para V1.

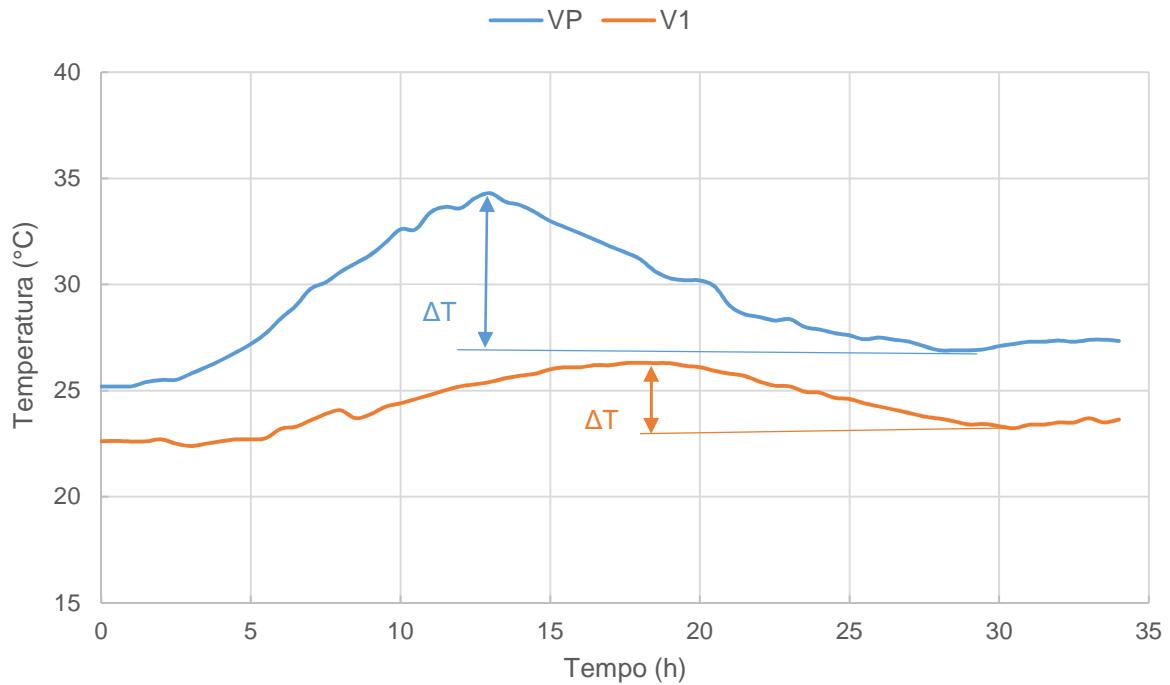
É possível observar que existe uma redução considerável de temperatura entre os dois concretos. O pico máximo de temperatura para VP foi de 34,30 °C enquanto que para V1 foi de 26,30 °C, o que corresponde a uma redução de 23,3%.

Além disso a mistura V1 apresentou uma variação de temperatura ΔT de apenas 3,07°C, que corresponde a menos da metade do ΔT da mistura VP, que foi de 7,40°C.

Com menos cimento para hidratar, a mistura V1 apresenta menor calor de hidratação. Isso traz vantagens importantes para o concreto, como menor perda de

água por evaporação e, por consequência, menor retração durante a cura. Controlar a variação térmica ΔT é uma das melhores formas de evitar a fissuração térmica.

Figura 48 - Gráfico da temperatura ao longo do processo de cura do concreto.



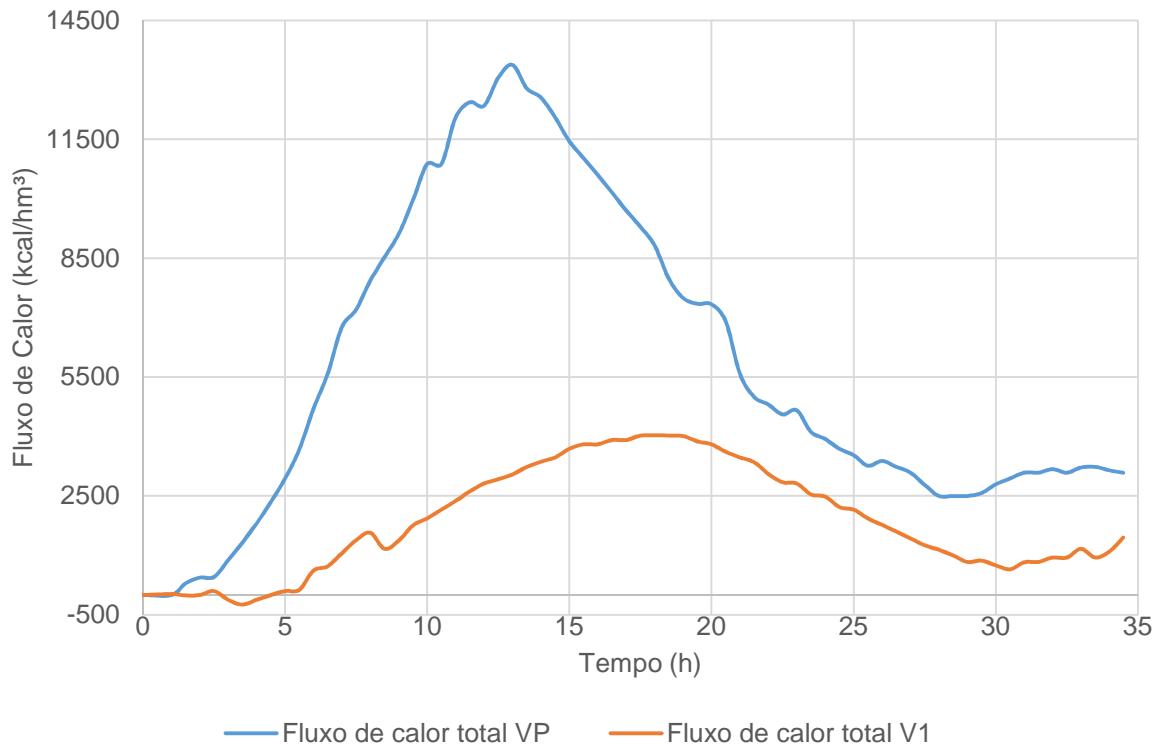
Fonte: O autor (2018).

É possível observar também, que a mistura V1 apresentou um pequeno retardamento no início de pega, se comparado a mistura VP, uma diferença de aproximadamente 2h. Assim como nos tempos de fim de pega, que foi de 13h para o VP e de 18h para o V1, aproximadamente.

4.4.3 Fluxo de calor total

A figura 49 mostra o gráfico do fluxo de calor total calculado a partir dos valores de temperatura de calor de hidratação obtidos no ensaio anterior com o calorímetro. Esses são os valores da carga térmica inseridos como dados de entrada para a simulação no Abaqus.

Figura 49 - Gráfico do fluxo de calor total.



Fonte: O autor (2018).

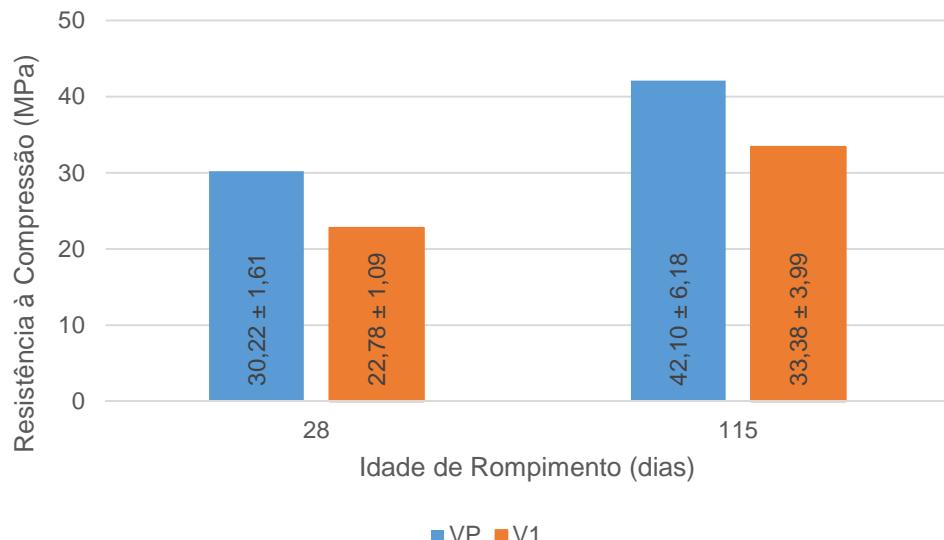
4.4.4 Resistência à compressão

A figura 50 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão das misturas V1 e VP para as idades de 28 e 115 dias de cura.

Neste ensaio, o concreto com alto teor de cinza volante, V1, apresentou resistência à compressão inferior ao concreto VP nas duas idades de cura, 28 e 115 dias. Aos 28 dias a mistura VP apresentou uma resistência 32,66% superior aos resultados da mistura V1, sendo que, essa diferença decresce para 26,12% aos 115 dias. Isso porque a mistura V1 apresentou um aumento de 46,53% na sua resistência de 28 para 115 dias, enquanto que, para a mistura VP, esse aumento foi de 39,31%.

Este tipo de evolução é uma tendência em concretos pozolânicos, uma vez que a reação pozolânica continua acontecendo mesmo após o fim da reação de hidratação do cimento e tende a ser mais acelerada a partir dos 28 dias de cura.

Figura 50 - Ensaio de resistência à compressão.

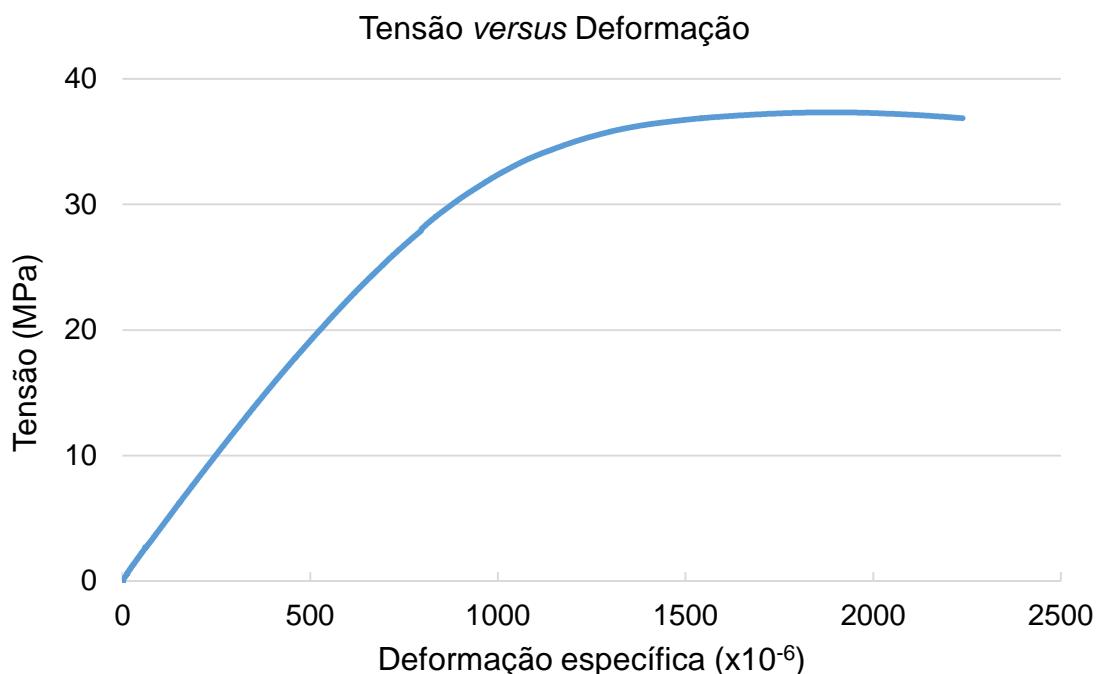


Fonte: O autor (2018).

4.4.5 Módulo de elasticidade estático

A figura 51 apresenta a curva de tensão-deformação gerada para a mistura V1 para o corpo de prova 1 (CP1) com alto teor de cinza volante.

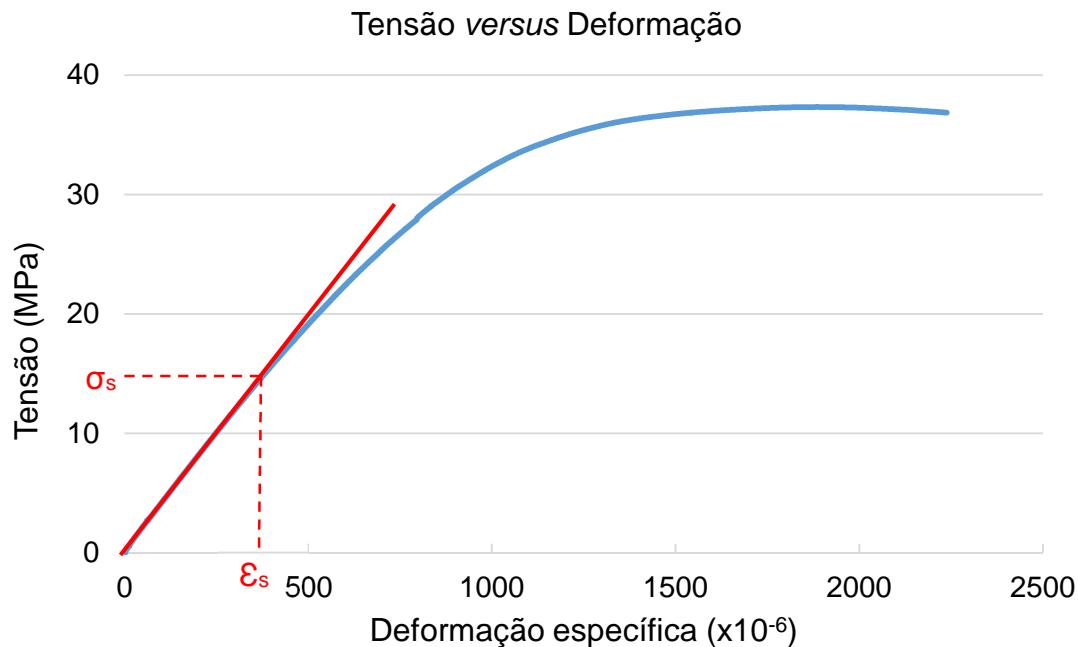
Figura 51 - Curva tensão-deformação CP1 da mistura V1.



Fonte: O autor (2018).

O módulo de elasticidade secante corresponde ao coeficiente angular da reta traçada da origem até o ponto da curva que corresponde a 40% da tensão de ruptura (σ_s), conforme figura 52.

Figura 52 - Linha traçada de forma secante a curva σ - ε .



Fonte: O autor (2018).

A tabela 23 apresenta os valores dos módulos de elasticidade secante, a média e o desvio padrão, calculados para os três corpos de provas (CP1, CP2 e CP3) ensaiados, todos pertencentes a mesma mistura V1.

Tabela 23 - Valores do módulo de elasticidade secante.

Corpo de prova	Tensão σ_s (MPa)	Deformação ε_s ($\times 10^{-6}$)	Módulo de elasticidade (GPa)
CP1	14,94	379,78	39,33
CP2	13,30	352,60	37,72
CP3	14,95	386,56	38,68
Média		$38,58 \pm 0,81$	

Fonte: O autor (2018).

Portanto o concreto V1, com 60% de cinza volante em substituição ao cimento Portland, possui um valor adequado de módulo de elasticidade para ser considerado concreto estrutural.

4.4.6 Massa específica, índice de vazios e absorção de água dos concretos

A tabela 24 apresenta os valores dos ensaios de índice de vazios, massa específica e absorção de água para os concretos VP e V1.

Tabela 24 - Massa específica, índice de vazios e absorção de água.

Ensaio	VP	V1
Índice de vazios (%)	10,46	8,95
Massa específica (g/cm ³)	2,63	2,50
Absorção de água (%)	4,44	3,93

Fonte: O autor (2018).

A reação pozolânica entre a cinza volante e o CH, presente principalmente na zona de transição, torna a matriz mais compacta e impermeável, pois diminui o índice de vazios dentro da pasta, o que diminui também a absorção de água do concreto. Isso contribui para uma menor permeabilidade e, por consequência, maior durabilidade do concreto, uma vez que dificulta a entrada de agentes agressivos no mesmo.

4.4.7 Condutividade térmica

A tabela 25 apresenta os valores de condutividade térmica calculados para as misturas V1 e VP.

Tabela 25 - Valores de condutividade térmica.

Condutividade (W/mk)	VP	V1
CP1	2,93	3,51
CP2	2,63	3,04
Média	2,78	3,28

Fonte: O autor (2018).

Observa-se que o concreto V1, com alto teor de cinza volante, é mais condutivo termicamente que o concreto VP. V1 apresenta uma condutividade 18% maior que VP. Isso ocorre porque a mistura V1 tem menor porosidade que VP. Uma maior condutividade ajuda a dissipar mais rapidamente as temperaturas geradas durante o processo de hidratação do cimento Portland, diminuindo assim o gradiente de temperatura.

4.4.8 Coeficiente de transmissão superficial de calor

A tabela 26 apresenta os valores dos coeficientes de transmissão superficial de calor calculados a partir dos valores de resistência térmica obtidos no ensaio de condutividade térmica. Estes dados foram utilizados como condição de contorno na simulação com o Abaqus.

Tabela 26 - Valores dos coeficientes de transmissão superficial de calor.

Coeficiente de transmissão superficial de calor (kcal/hm ² °C)	VP	V1
	34,25	40,42

Fonte: O autor (2018).

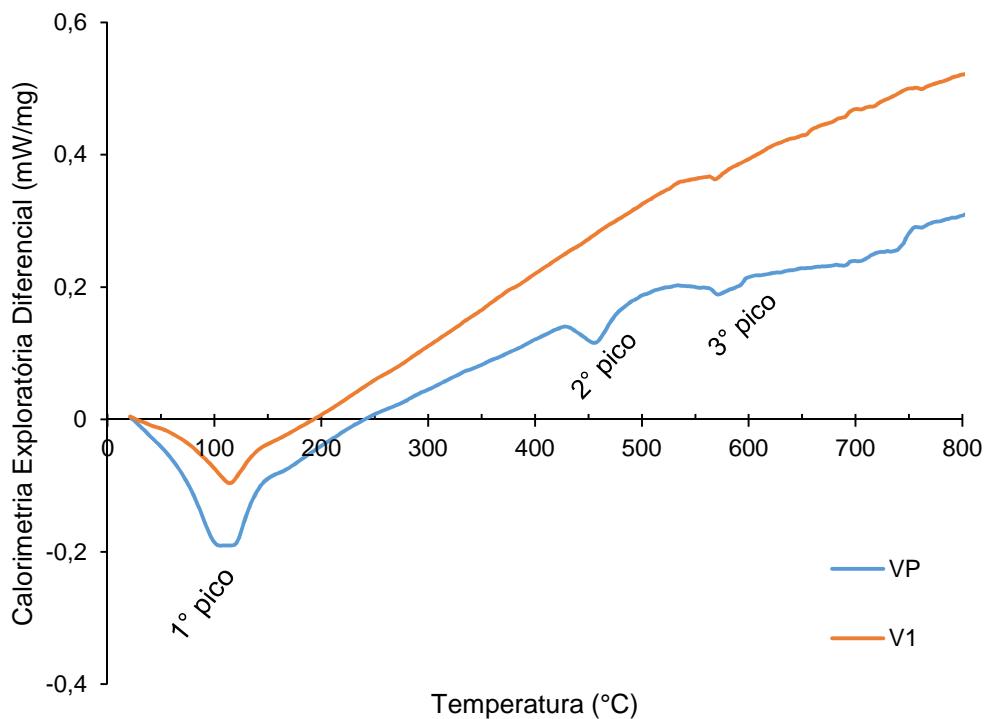
4.4.9 Termogravimetria DTG e TGA

A figura 53 mostra os resultados do ensaio DTG para as amostras V1 e VP com os picos endotérmicos característicos deste ensaio.

O resultado do ensaio de termogravimetria apresenta 3 picos endotérmicos importantes.

O primeiro pico acontece entre 100 e 150 °C e representa a perda da água adsorvida no concreto. É possível reparar que este pico é maior para o concreto V1, devido ao uso da cinza volante, que possui maior área superficial específica que o cimento.

Figura 53 - Resultados do ensaio DTG para amostras V1 e VP.



Fonte: O autor (2018).

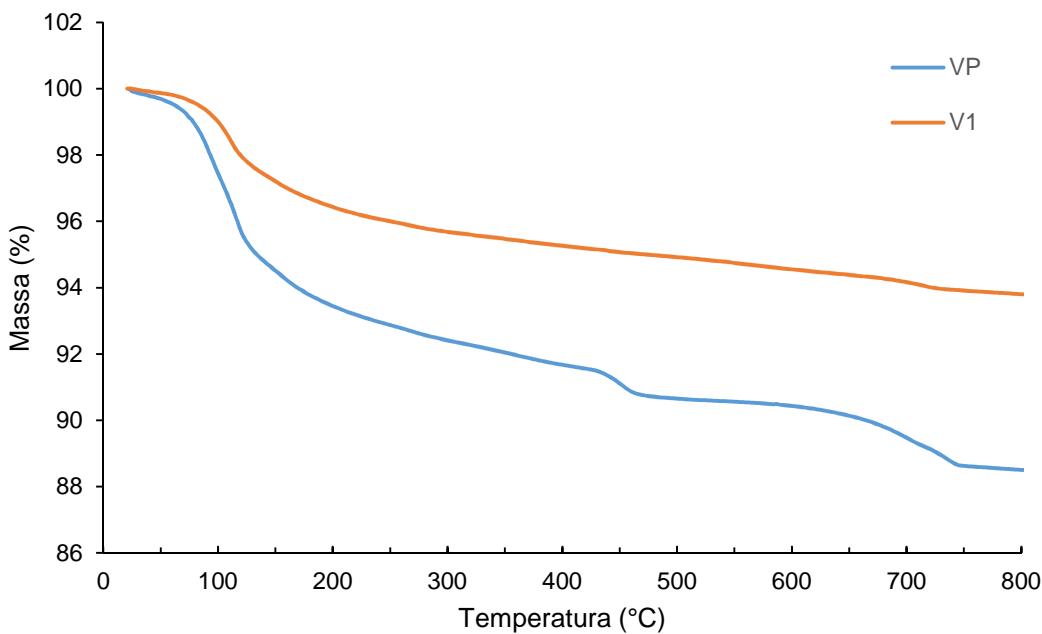
O segundo pico endotérmico, talvez o mais importante, acontece entre 400 e 450 °C e indica a decomposição do hidróxido de cálcio. É importante reparar que este pico é imperceptível no concreto V1, isso indica que a cinza volante consumiu hidróxido de cálcio durante sua reação pozolânica.

O terceiro e último pico endotérmico acontece entre 550 e 600 °C e mostra a decomposição do CaCO₃ (carbonato de cálcio).

Já a figura 54 mostra os resultados do ensaio TGA. Este ensaio é complementar ao DTG e apresenta as perdas de massa dos compostos químicos correspondente aos picos endotérmicos indicados do DTG.

A perda de massa, correspondente ao CH, que aconteceu entre 400 e 450°C foi maior para o concreto VP, 1,03%. Para o concreto V1 a perda de massa foi de 0,34%, praticamente um terço da quantidade de CH do concreto VP. Isso evidencia que a cinza volante consumiu quase todo hidróxido de cálcio da mistura V1 e está de acordo com o resultado do ensaio DTG.

Figura 54 - Resultados do ensaio TGA para amostras V1 e VP.



Fonte: O autor (2018).

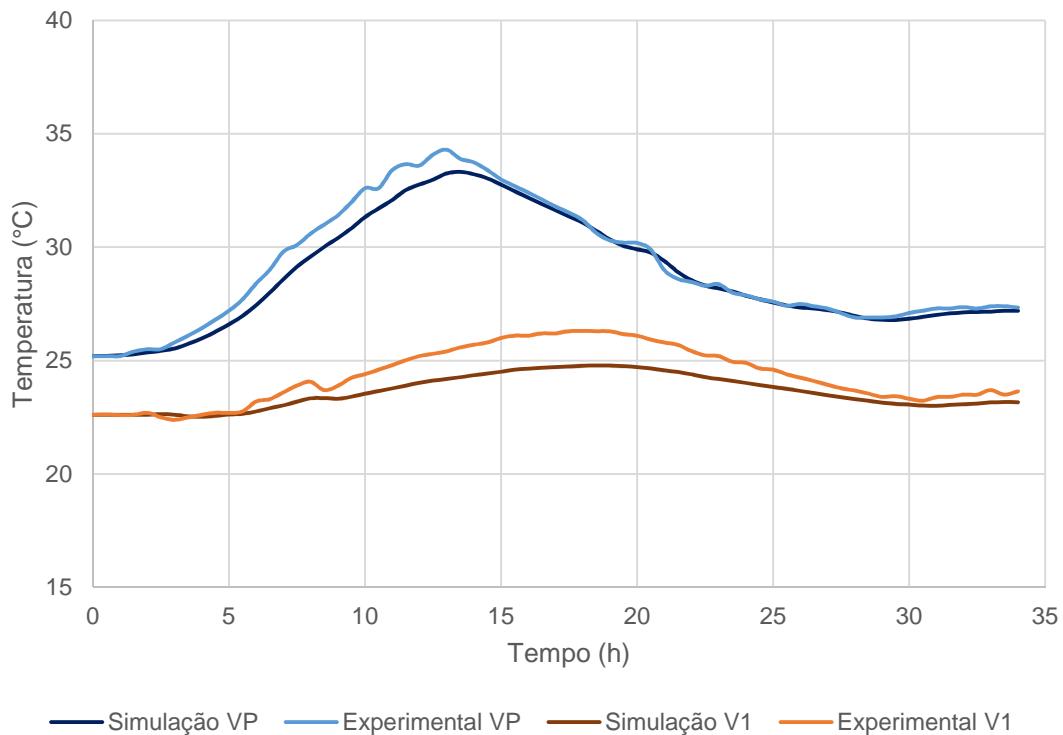
4.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A figura 55 apresenta um gráfico comparando as temperaturas de calor de hidratação medidas nos experimentos, para as misturas VP e V1, com as temperaturas geradas pelo Abaqus após a simulação.

Pode-se verificar que as temperaturas máximas, do experimento e da simulação, ficaram muito próximas, sendo uma diferença menor que 3% para VP e cerca de 6% para V1. Isso mostra que os dados de entrada utilizados na simulação, assim como as condições de contorno, foram adequados.

A diferença de temperatura apresentada entre a simulação e o experimento da amostra V1, se deve provavelmente ao valor de calor específico utilizado para V1. Se o mesmo pudesse ter sido medido em laboratório, provavelmente essa diferença seria menor. Outro fator que justifica as diferenças de temperatura para V1 e VP é que o valor de condutividade térmica utilizado na simulação é proveniente de um ensaio em que o concreto já se encontra no estado endurecido, enquanto que na prática, a condução térmica acontece parte durante o estado fresco e parte no estado endurecido, ou seja, o valor da condutividade térmica não é constante.

Figura 55 - Gráfico comparativo entre temperaturas experimentais e simuladas.



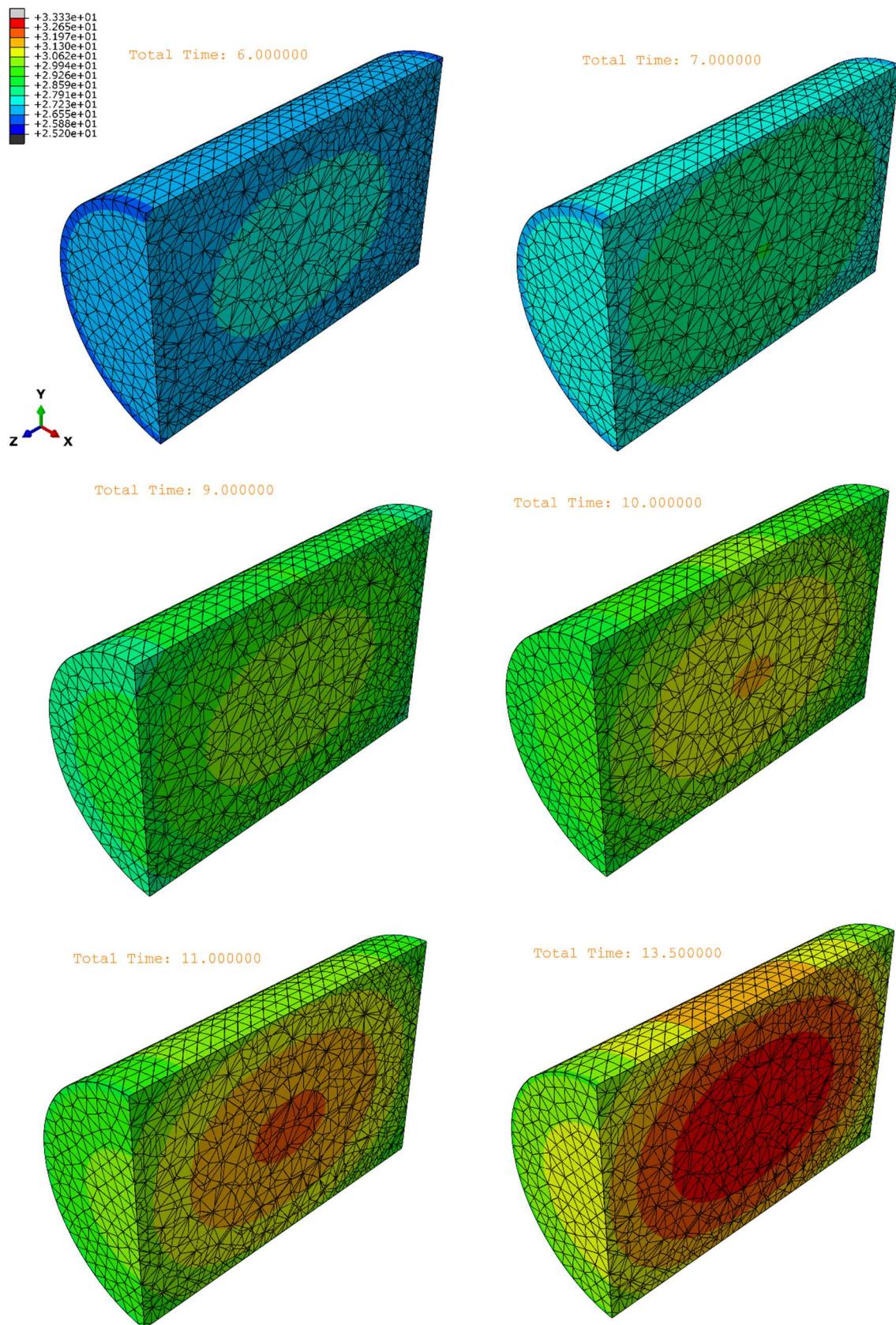
Fonte: O autor (2018).

De qualquer forma, os resultados são satisfatórios e podem ser utilizados para estudar a distribuição das temperaturas ao longo de todo corpo de prova. Aliás, apenas a simulação pode proporcionar esta análise, uma vez que no experimento o termopar mede apenas a variação de temperatura no centro de gravidade da amostra.

Desta maneira, a figura 56 apresenta a distribuição das temperaturas ao longo de todo corpo de prova durante a etapa de aquecimento para VP, chegando ao ponto máximo aproximadamente com 13,5h, enquanto que a figura 57 apresenta a distribuição das temperaturas durante o resfriamento.

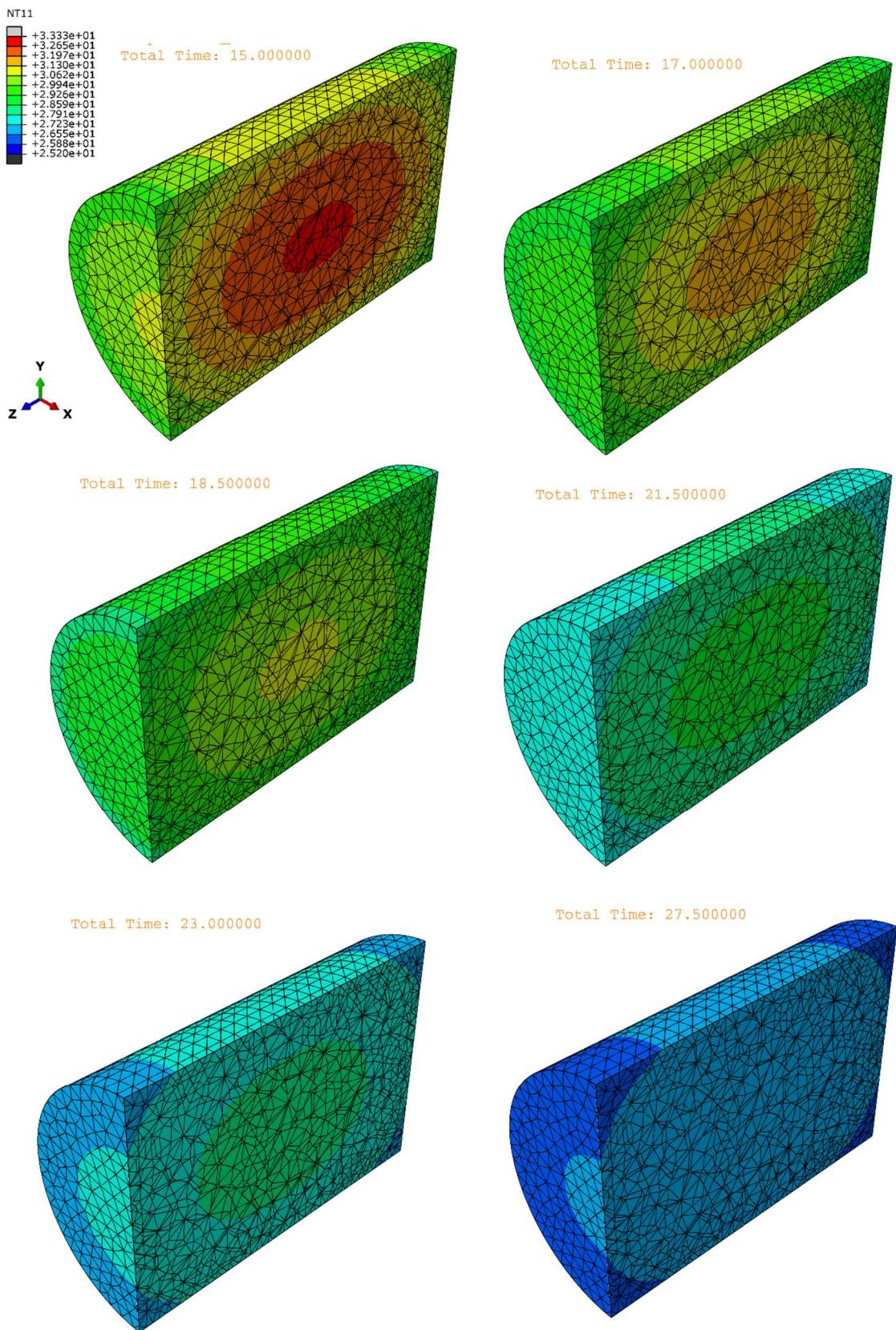
Do mesmo modo, a figura 58 apresenta a distribuição das temperaturas ao longo de todo corpo de prova durante a etapa de aquecimento para a mistura V1, chegando ao seu ponto máximo aproximadamente com 19h, enquanto que a figura 59 apresenta a distribuição das temperaturas ao longo do corpo de prova durante o processo de resfriamento.

Figura 56 - Distribuição de temperaturas para VP durante aquecimento.



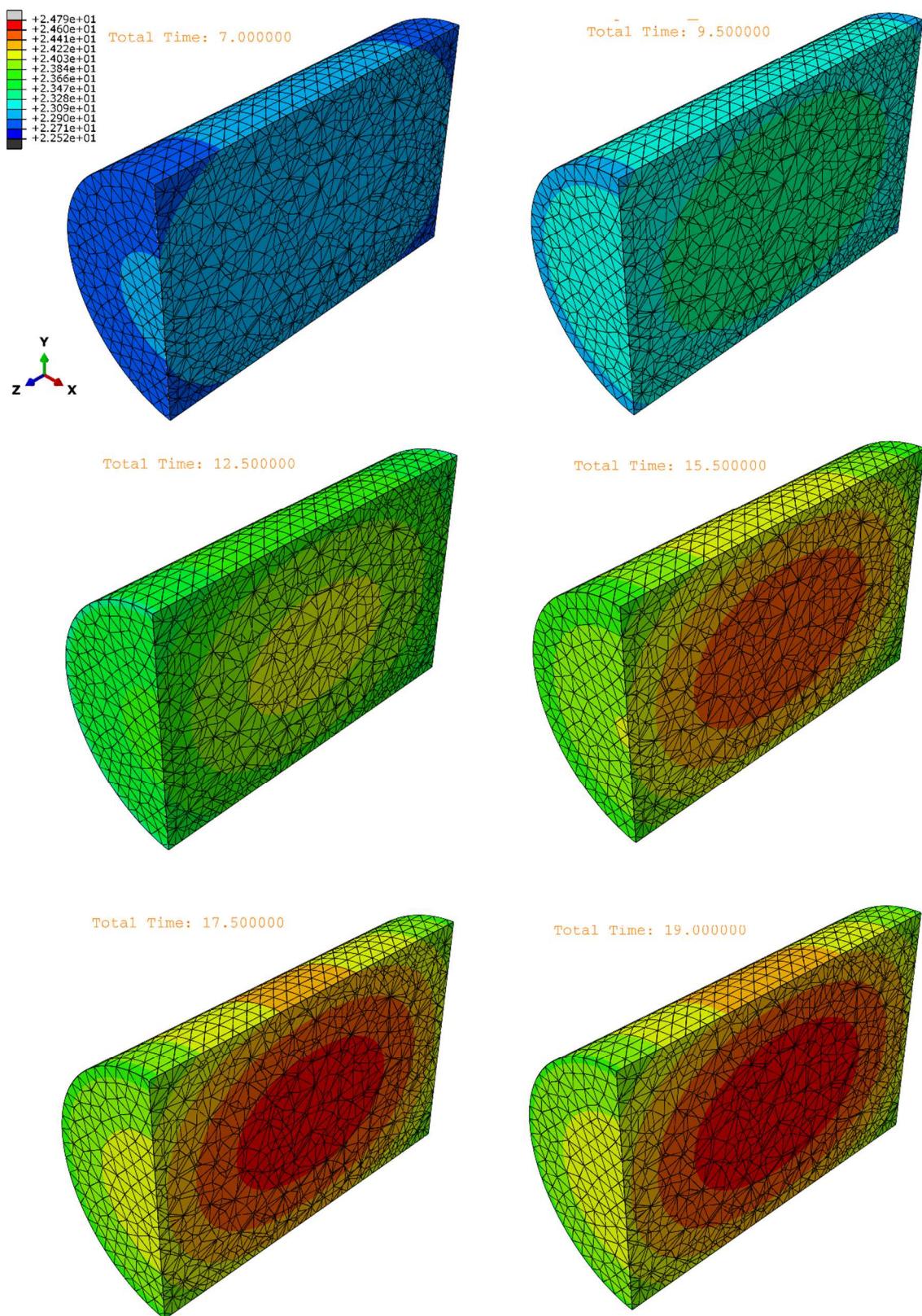
Fonte: O autor (2018).

Figura 57 - Distribuição de temperaturas para VP durante resfriamento.



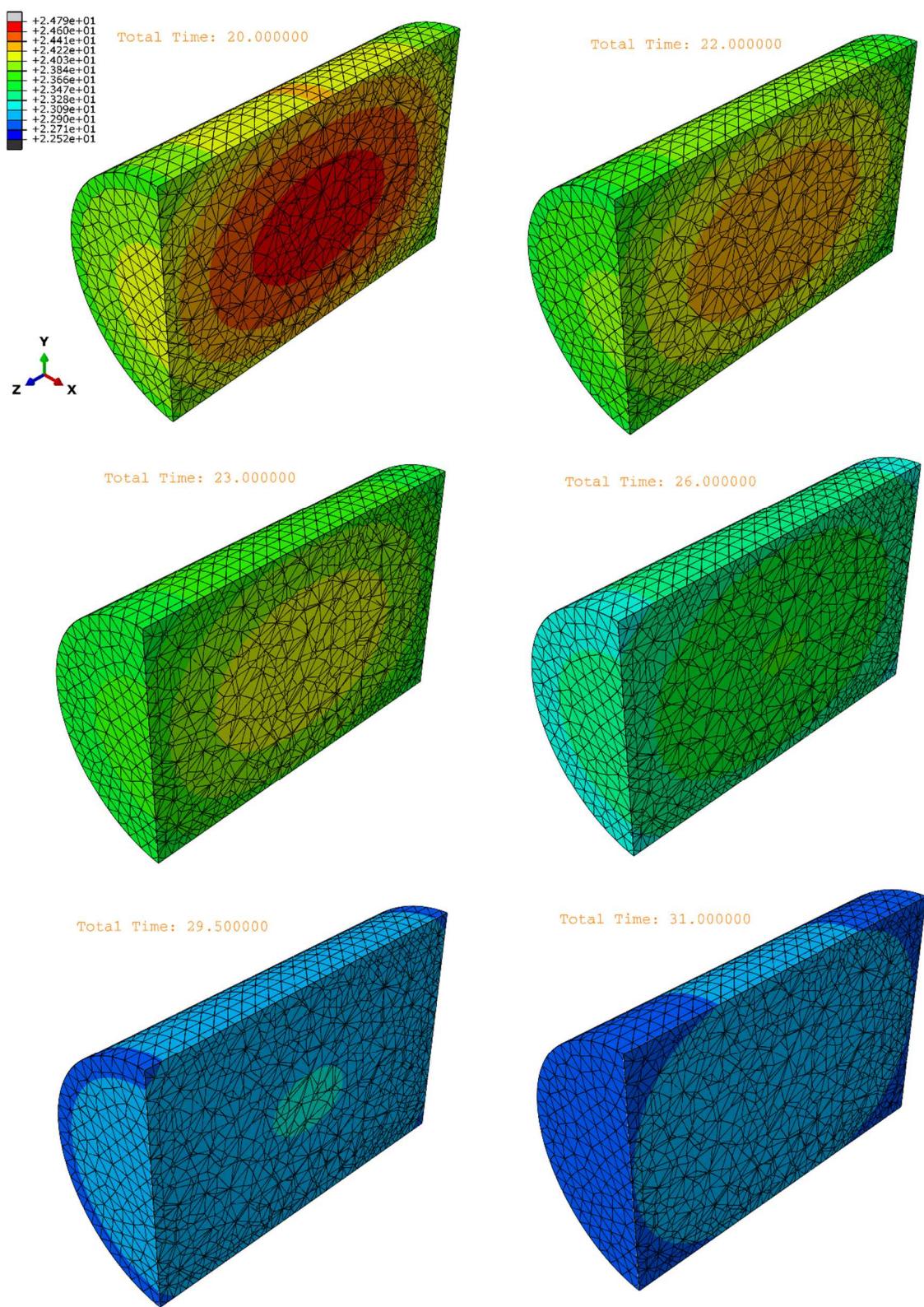
Fonte: O autor (2018).

Figura 58 - Distribuição de temperaturas para V1 durante aquecimento.



Fonte: O autor (2018).

Figura 59 - Distribuição de temperaturas para V1 durante resfriamento.

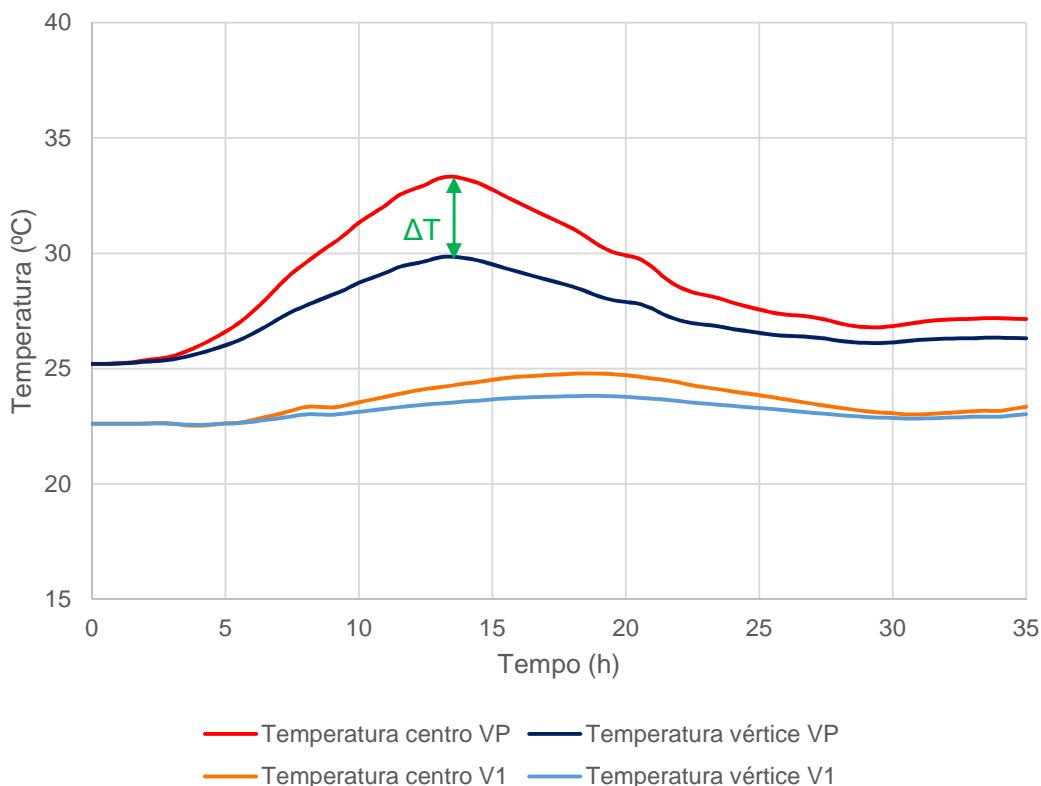


Fonte: O autor (2018).

Como já explicado, a variação de temperatura (ΔT) entre dois pontos do corpo de prova geram tensões internas que causam deformações e, por consequência, fissuração. É importante ressaltar que as tensões internas dependem também do grau de restrição da peça assim como do módulo de elasticidade do concreto.

A temperatura diferencial pode ser medida com auxílio do programa Abaqus para quaisquer pontos ao longo do corpo. O caso mais extremo é entre o centro de gravidade (que apresentou a temperatura mais quente) e um ponto mais distante possível do CG, que se encontra ao longo do vértice externo do sólido, que apresentou a menor temperatura. Para este dois pontos gerou-se a evolução das temperaturas ao longo do tempo, para as duas misturas VP e V1, conforme apresenta a figura 60.

Figura 60 - Temperatura diferencial entre os pontos mais extremos de VP e V1.



Fonte: O autor (2018).

Pode-se observar, que existe uma grande diferença entre o ΔT da mistura VP quando comparado à mistura V1. Enquanto que para a mistura VP o valor de ΔT é 3,5°C, para a mistura V1 o valor de ΔT é 0,98°C.

Isso significa que o gradiente de temperatura da mistura VP, com cimento puro, é muito maior do que V1, o que indica maior probabilidade de fissuração. Portanto

pode-se afirmar que a utilização de alto teor de cinza volante é uma ótima alternativa para controlar o gradiente de temperatura e, portanto, ajuda a diminuir as retrações térmicas no concreto.

4.6 PROPRIEDADES MICROESTRUTURAIS DOS CONCRETOS V1 E VP

As figuras 61 e 62 apresentam imagens de micrografia (com aumento de 70x) realizadas em diferentes pontos da amostra do concreto VP com 115 dias de cura. É possível observar a existência de fissuras em todas imagens, de forma excessiva, e com comportamentos semelhantes. As fissuras tendem a contornar os agregados miúdos, ao longo da zona de transição pasta/agregado, e se propagar pela matriz até o próximo agregado. Nota-se também, uma heterogeneidade da forma e do tamanho dos grânulos do agregado miúdo (areia).

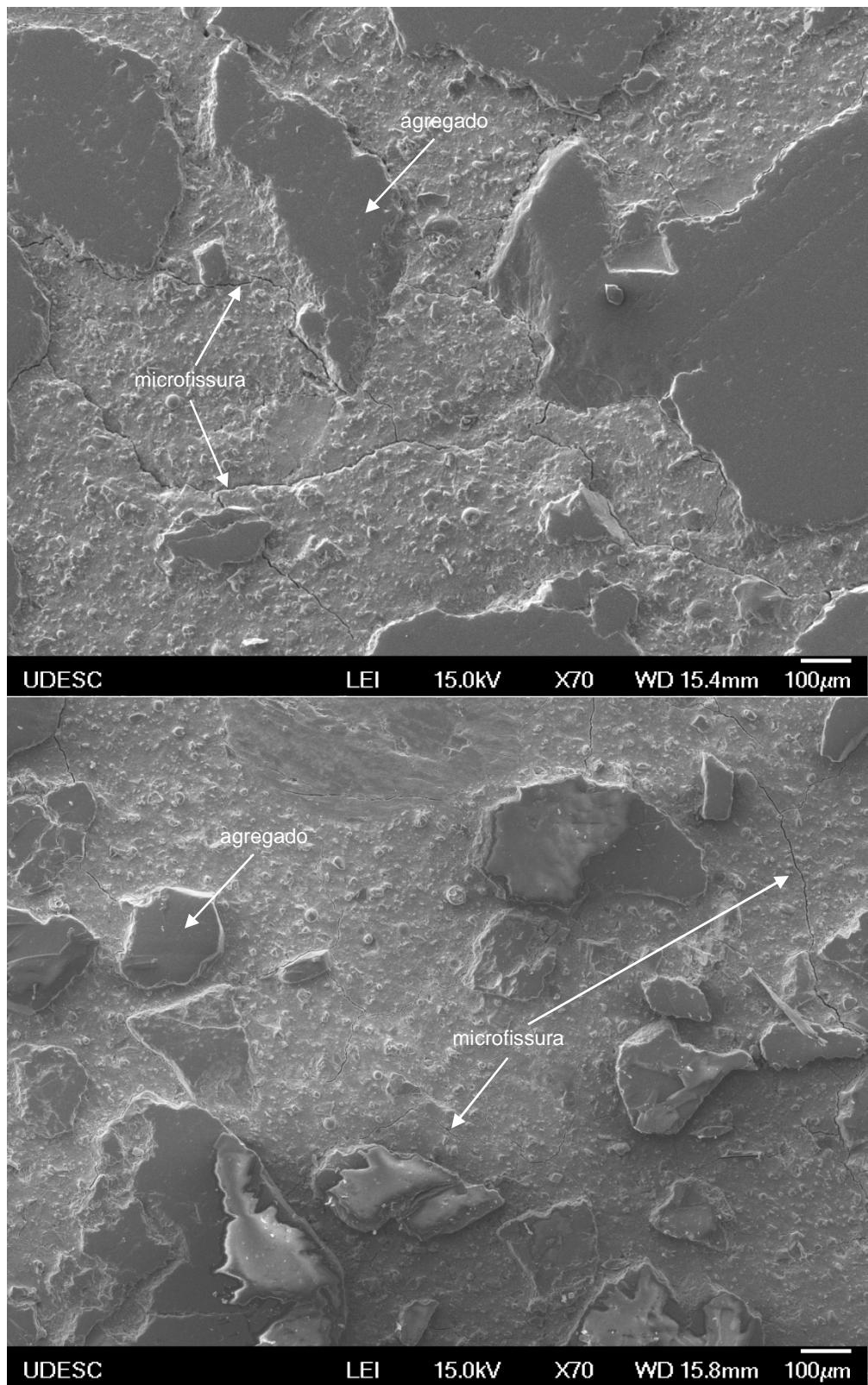
Enquanto que, as figuras 63 e 64 apresentam imagens de micrografia (70x) feitas em diferentes pontos da amostra do concreto V1 com 115 dias de cura. De forma geral, estas micrografias não apresentam a mesma distribuição de fissuras observadas na amostra do concreto VP. Os corpos de prova de onde foram extraídas as amostras receberam o mesmo tratamento e foram rompidos sobre as mesmas condições, no mesmo equipamento. Portanto pode-se sugerir que parte da fissuração excessiva presente ao longo de toda amostra VP, se deve a retração térmica, uma vez que VP apresentou uma variação de temperatura muito maior que o concreto V1.

Vale observar também que, diferente do que acontece na amostra V1, as fissuras presentes na amostra VP se propagam ao longo da zona de transição. Provavelmente esse comportamento é devido ao fato do concreto VP possuir mais cristais de CH, conforme demonstrado anteriormente no ensaio de termogravimetria.

Além disto, observa-se nas imagens da mistura V1, algumas partículas de cinza volante dispersas sob a forma de pequenas partículas esféricas de vidro silicoaluminoso de diferentes tamanhos, o que pode indicar uma saturação de cinza volante na mistura.

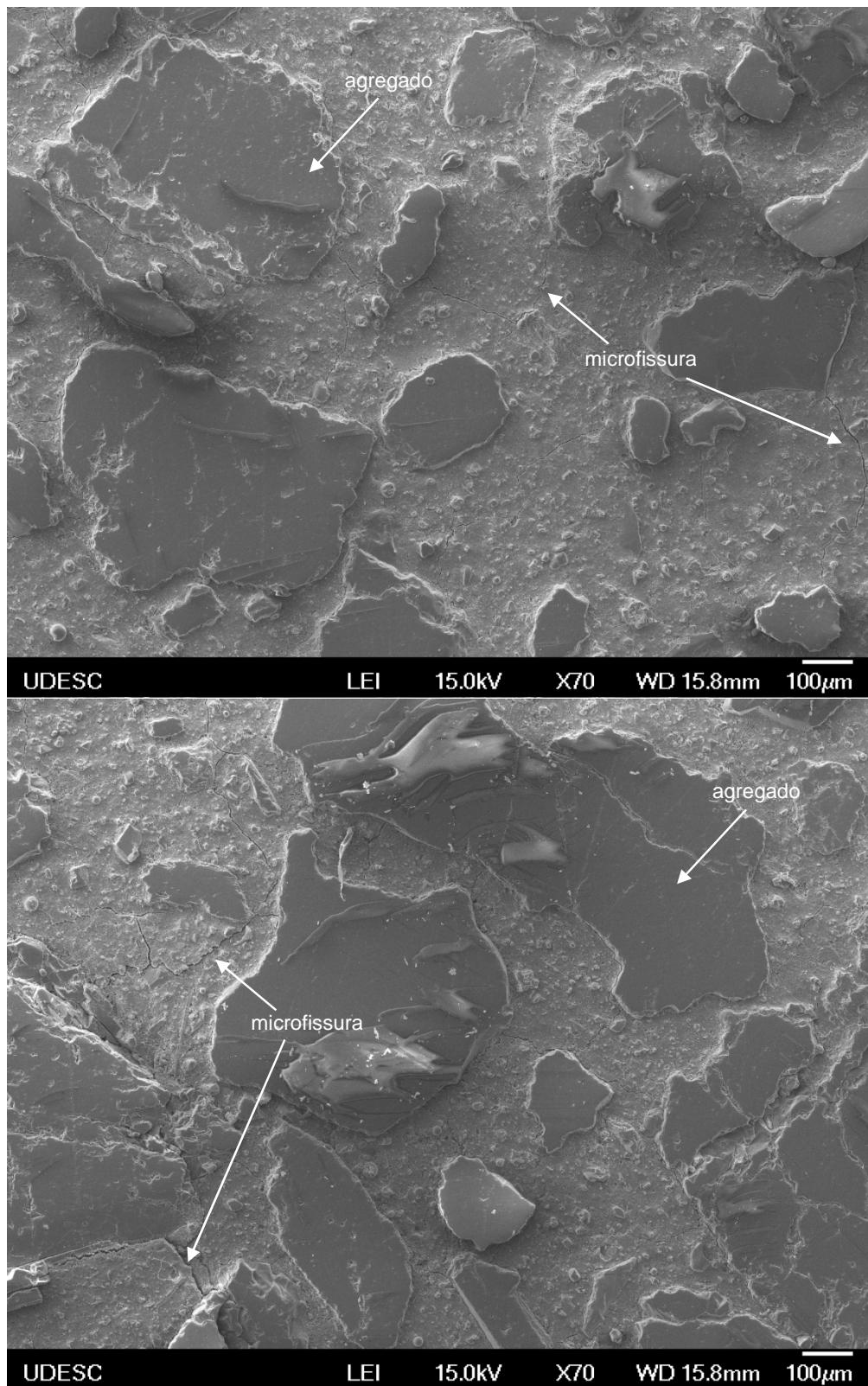
Apesar de tudo, não é possível afirmar com absoluta certeza que a fissuração excessiva presente na amostra do concreto VP seja devido apenas à retração térmica. Afinal o grau de restrição da peça e o módulo de elasticidade do concreto também influenciam na fissuração.

Figura 61 - Micrografias do concreto VP com 115 dias. Aumento 70x.



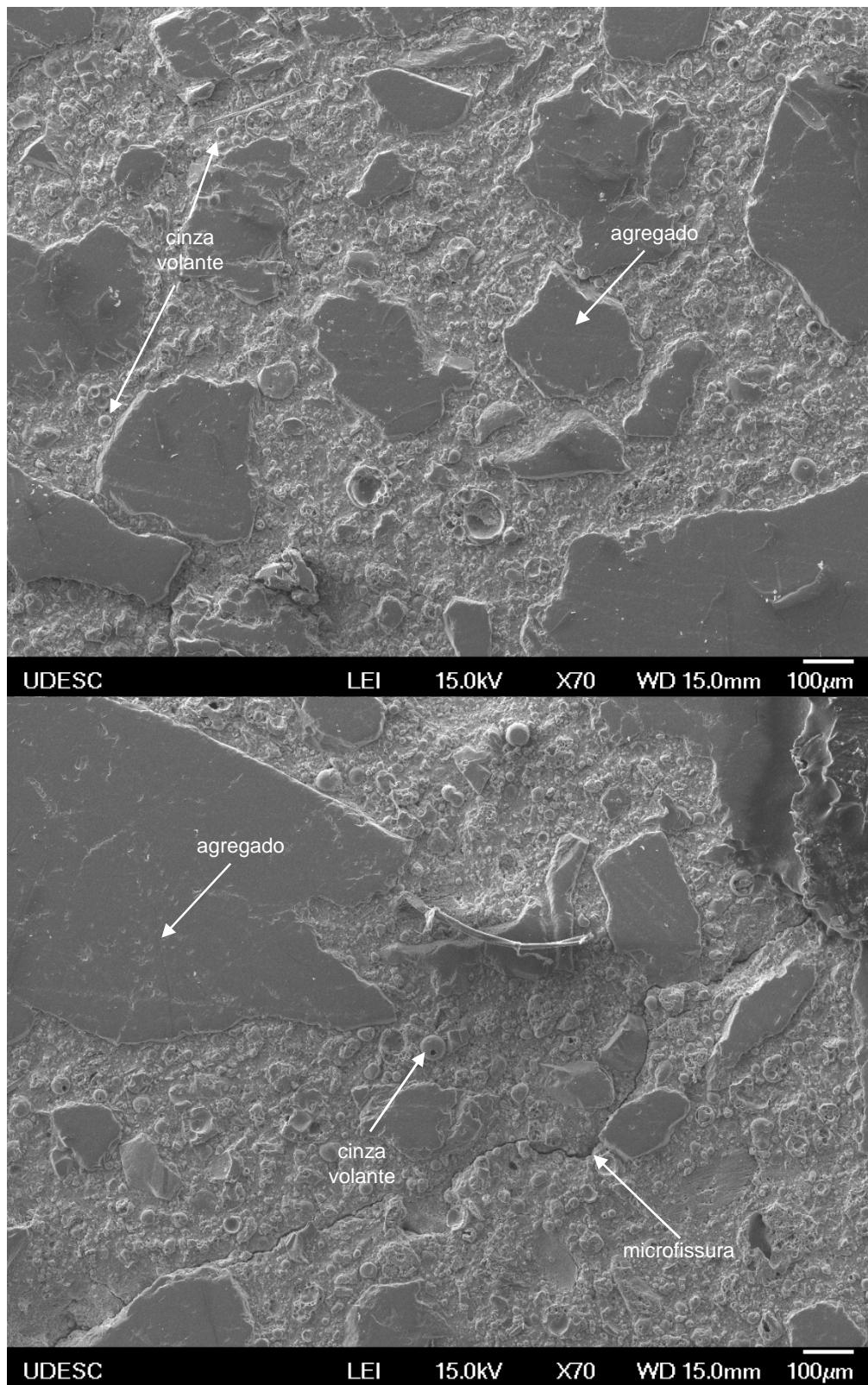
Fonte: O autor (2018).

Figura 62 - Micrografias do concreto VP com 115 dias. Aumento 70x.



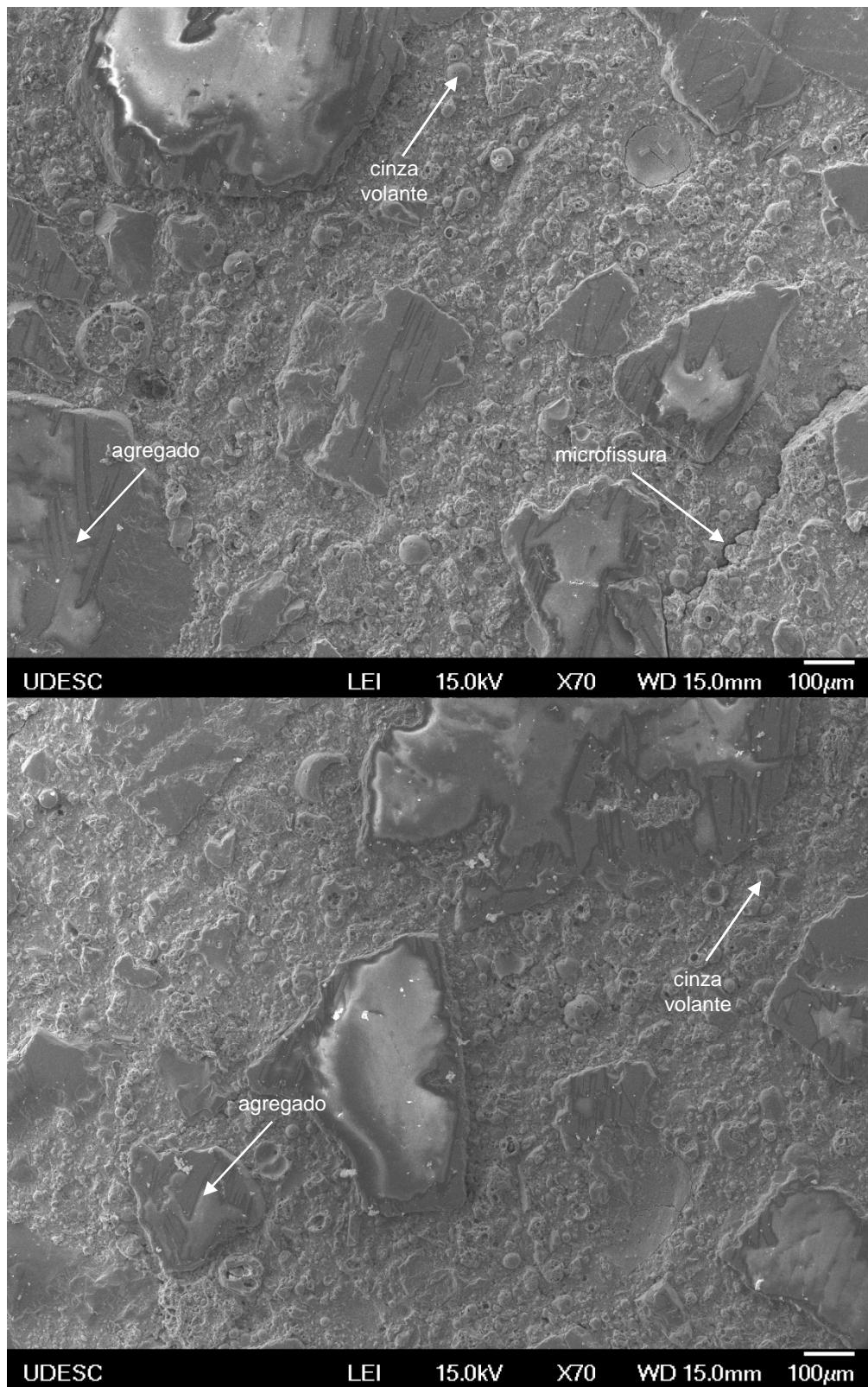
Fonte: O autor (2018).

Figura 63 - Micrografias do concreto V1 com 115 dias. Aumento 70x.



Fonte: O autor (2018).

Figura 64 - Micrografias do concreto V1 com 115 dias. Aumento 70x.

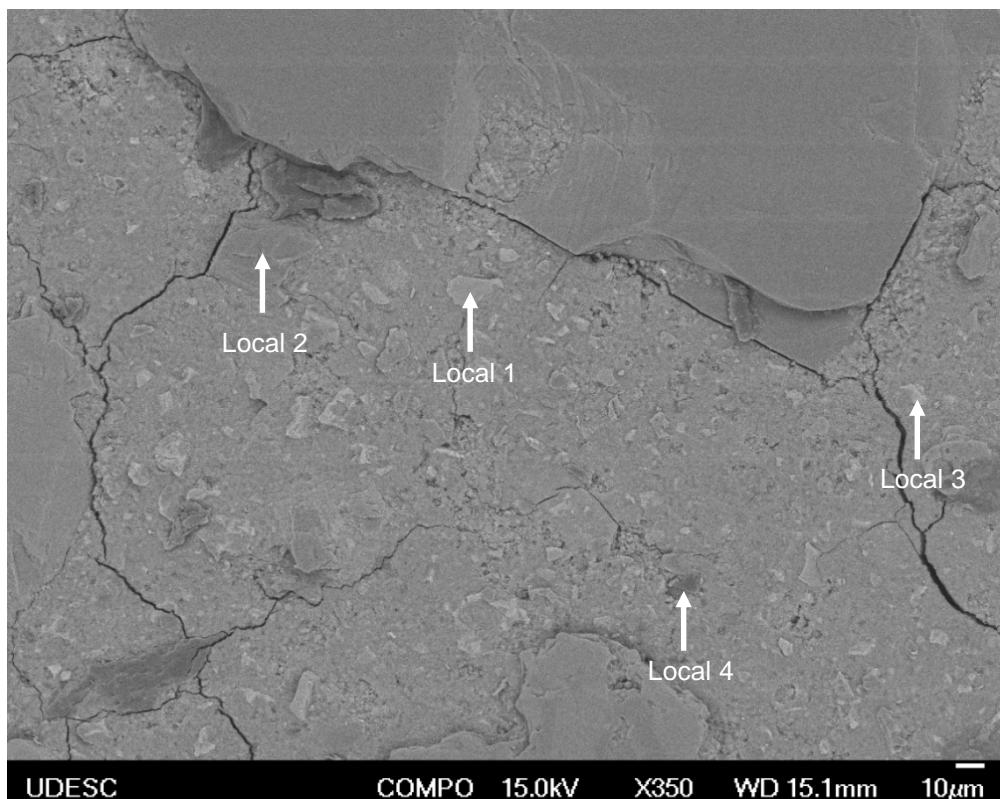


Fonte: O autor (2018).

4.6.1 Análise EDS

A figura 65 apresenta micrografia BSE da superfície polida do concreto VP com 115 dias de idade com aumento de 350x. Destacam-se na imagem as fissuras ao longo da zona de transição interfacial dos agregados.

Figura 65 - Micrografia BSE do concreto VP com 115 dias. Aumento 350x.



Fonte: O autor (2018).

O espectro EDS (figura 66) do local 1 da figura 65 indica cálcio, silício, alumínio e oxigênio como os principais elementos. De acordo com resultados da composição química semi-quantitativa (tabela 27) a razão molar Ca/Si é 1,11. Assim, o local 1 pode ser provavelmente o produto da hidratação do cimento formado principalmente por CSH, uma vez que a relação Ca/Si comumente obtida para a fase gel CSH é de 0,7 a 2,0 (TENNIS *et al.*, 2000 *apud* SCHACKOW, 2011).

Figura 66 - Espectro EDS do local 1.

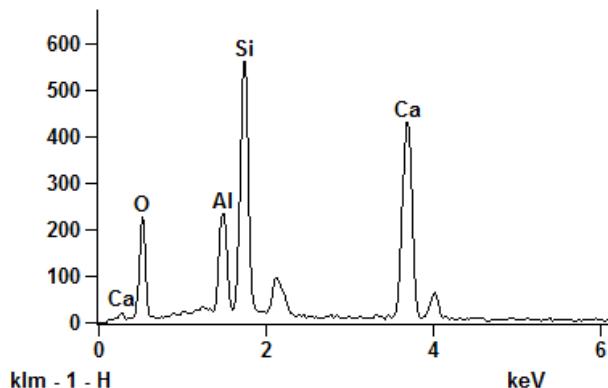


Tabela 27 - Análise química local 1.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	37,73
Si	21,19
Al	7,42
Ca	33,65

Fonte: O autor (2018).

Para o local 2 da figura 65 o espectro EDS (figura 67) revela oxigênio e silício como únicos elementos químicos. A composição química (tabela 28) revela que o local 2 seja provavelmente um grão de quartzo.

Figura 67 - Espectro EDS do local 2.

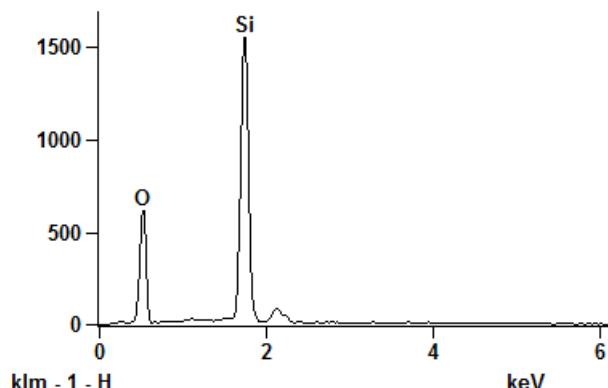


Tabela 28 - Análise química local 2.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	51,03
Si	48,97

Fonte: O autor (2018).

O espectro EDS (figura 68) para o local 3 da figura 65 indica oxigênio, alumínio, cálcio e ferro como principais elementos, portanto analisando sua composição química (tabela 29) provavelmente o local 3 se trata de um constituinte não hidratado do cimento, no caso o ferroaluminato de cálcio ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$).

Figura 68 - Espectro EDS do local 3.

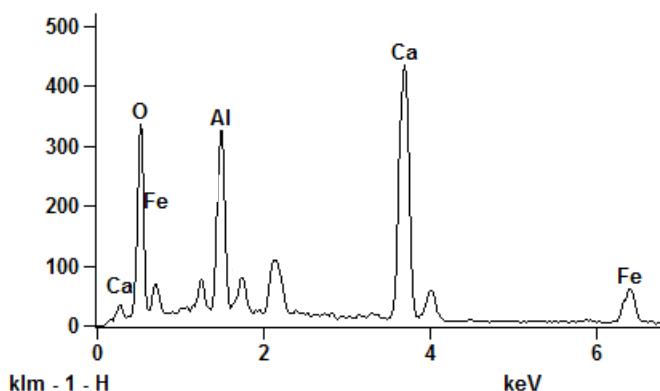


Tabela 29 - Análise química local 3.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	40,86
Al	10,71
Ca	31,92
Fe	16,60

Fonte: O autor (2018).

O espectro EDS (figura 69) para o local 4 da figura 65 indica oxigênio, alumínio, cálcio e ferro como principais elementos, portanto analisando sua composição química (tabela 30) provavelmente o local 4 é a fase constituinte do cimento, silicato tricálcio ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_5$), não hidratado.

Figura 69 - Espectro EDS do local 4.

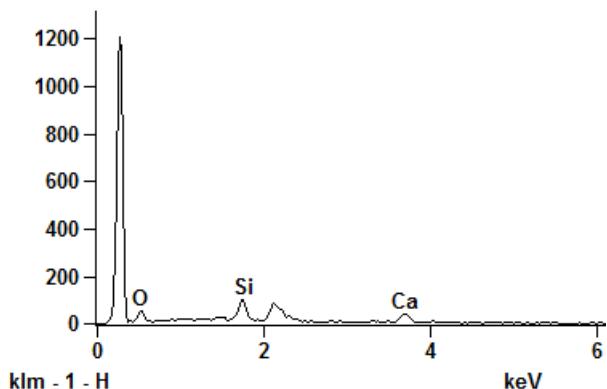


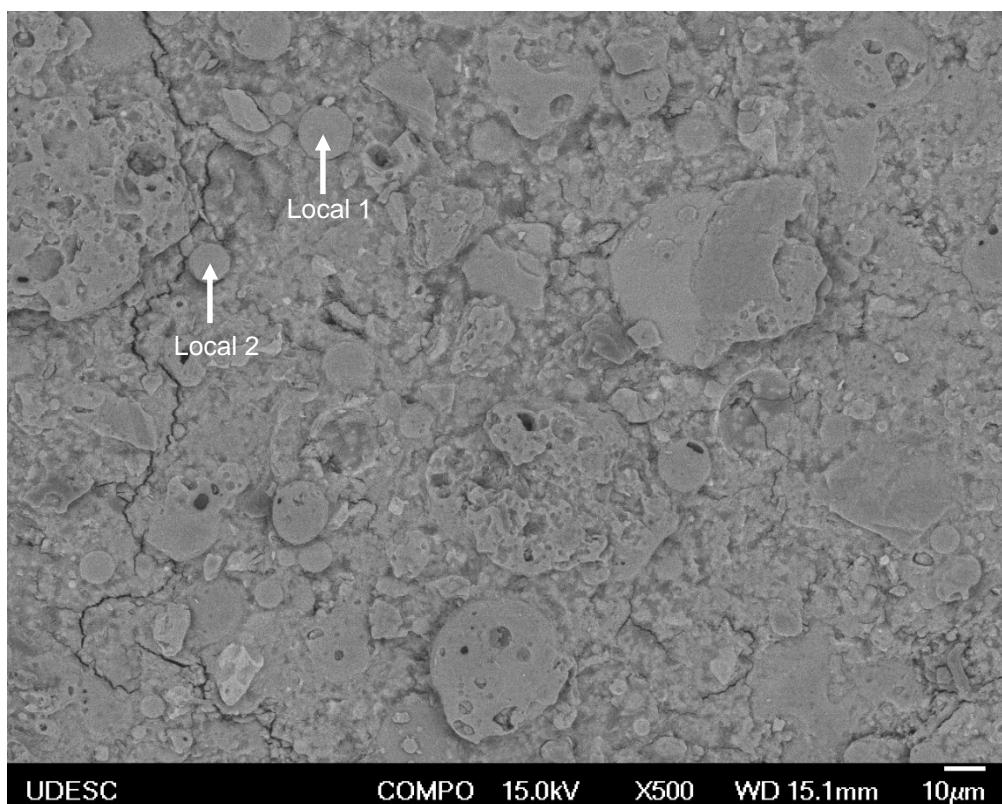
Tabela 30 - Análise química local 4.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	58,92
Si	22,54
Ca	18,54

Fonte: O autor (2018).

A figura 70 apresenta micrografia BSE da superfície polida do concreto V1 com 115 dias de idade com aumento de 500x. Vale destacar a menor quantidade de fissuras quando comparado com a figura 65 do concreto VP. Além disso é possível observar que existem partículas de cinza volante que não reagiram, como por exemplo os locais 1 e 2.

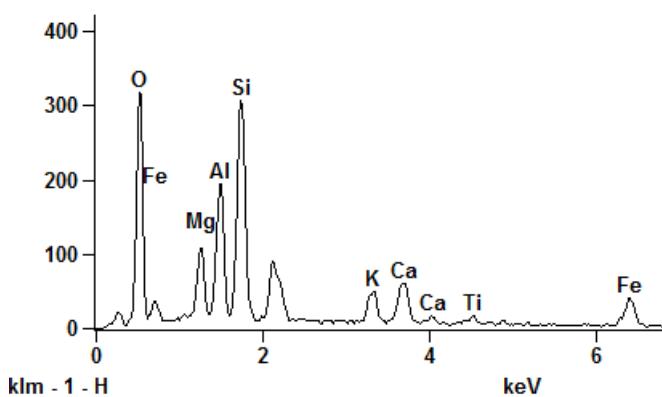
Figura 70 - Micrografia BSE do concreto V1 com 115 dias. Aumento 500x.



Fonte: O autor (2018).

O espectro EDS (figura 71) para o local 1 da figura 70 indica vários elementos, comparando a composição química do espectro (tabela 31) com a análise FRX da cinza volante, apresentada anteriormente, é possível dizer que o local 1 se trata de uma partícula de cinza volante que não reagiu. O mesmo vale para o local 2, conforme apresentado no espectro da figura 72 e análise química da tabela 32.

Figura 71 - Espectro EDS do local 1.

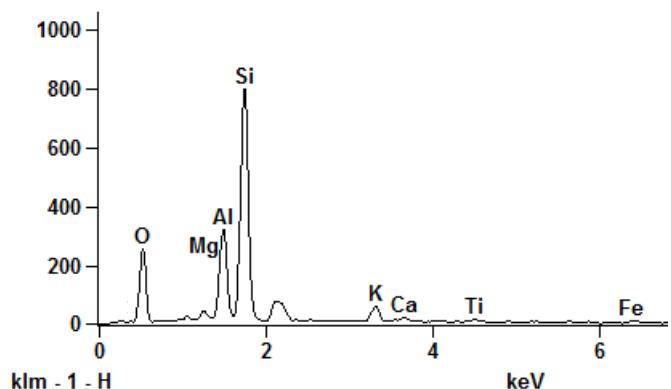


Fonte: O autor (2018).

Tabela 31 - Análise química local 1.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	41,29
Si	17,43
Al	8,77
Ca	5,60
Ti	1,04
Fe	17,05
Mg	4,97
K	3,85

Figura 72 - Espectro EDS do local 2.



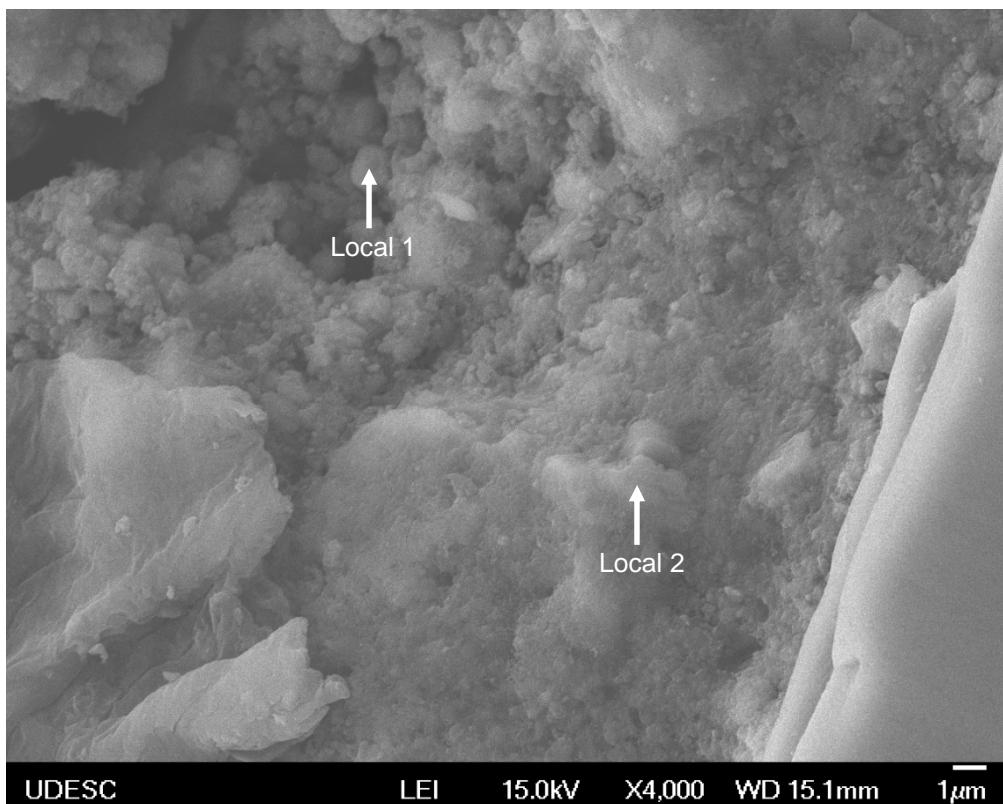
Fonte: O autor (2018).

Tabela 32 - Análise química local 2.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	37,22
Si	25,60
Al	11,63
Ca	8,95
Ti	1,71
Fe	9,35
Mg	0,99
K	4,55

A figura 73 apresenta micrografia da zona de transição do concreto VP com 115 dias de idade e aumento de 4000x. É possível observar que existe uma porosidade maior no lado superior esquerdo da imagem, assim como a presença de formas geométricas bem definidas, o que podem ser cristais de hidróxido de cálcio, conforme análise química apresentada a seguir. Existem também regiões onde a matriz é menos porosa, como o local 2, provavelmente devido ao CSH.

Figura 73 - Micrografia da zona de transição do concreto VP (aumento 4000x).



Fonte: O autor (2018).

O espectro EDS (figura 74) para o local 1 da figura 73 indica apenas cálcio e oxigênio, analisando sua composição química (tabela 33) provavelmente o local 1 corresponde a um cristal de hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Figura 74 - Espectro EDS do local 1.

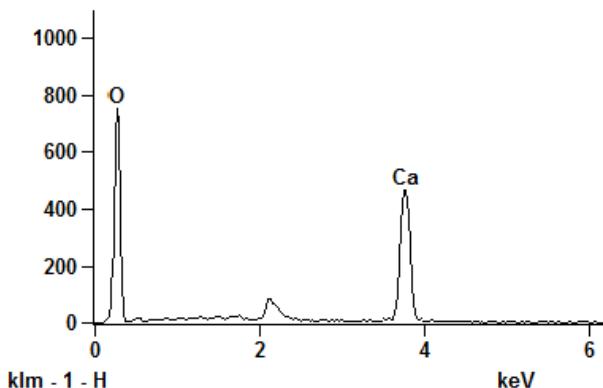


Tabela 33 - Análise química local 1.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	55,60
Ca	44,40

Fonte: O autor (2018).

Enquanto o espectro EDS (figura 75) para o local 2 da figura 73 indica oxigênio, silício e cálcio como principais elementos. De acordo com resultados da composição química (tabela 34) existem pequenas quantidades de alumínio, ferro, magnésio e a razão molar Ca/Si é 1,51. Assim, o local 2 pode provavelmente ser composto por uma mistura de fases, formado principalmente por CSH, e ferroaluminato tetracálcio parcialmente hidratado.

Figura 75 - Espectro EDS do local 2.

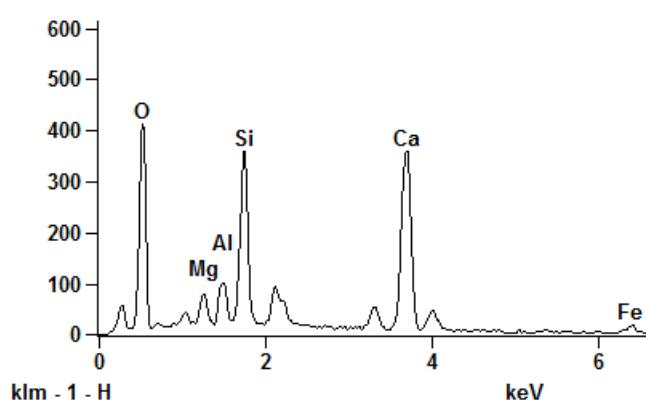


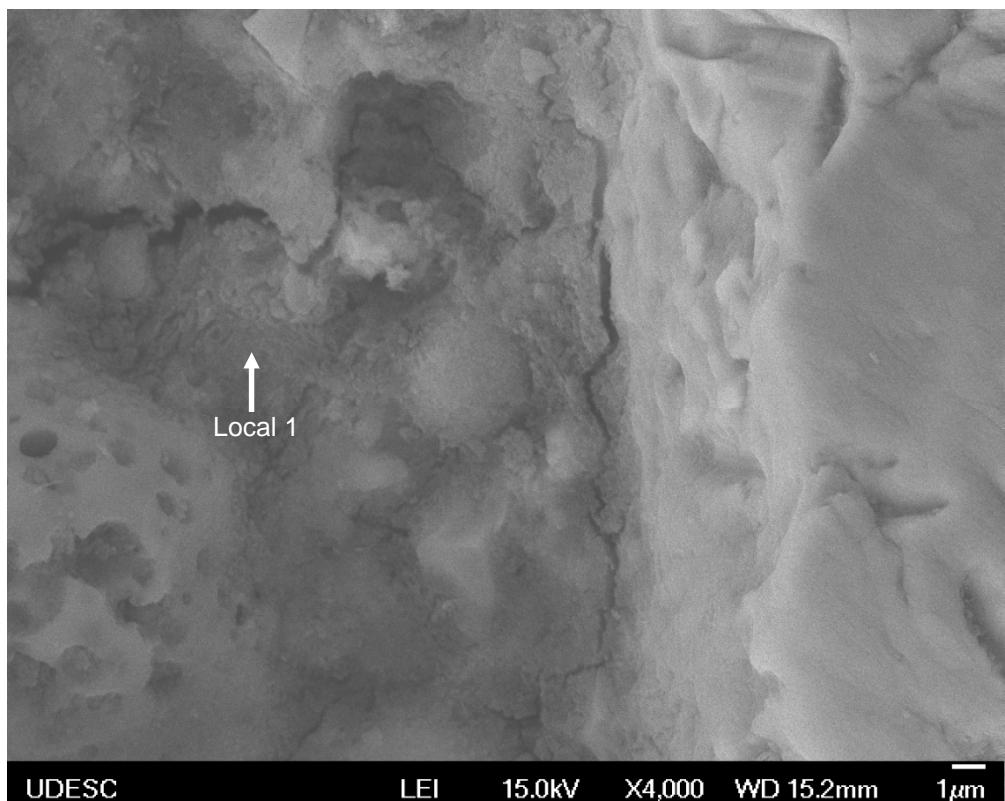
Tabela 34 - Análise química local 2.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	52,55
Si	11,26
Al	4,71
Ca	24,28
Fe	4,81
Mg	2,39

Fonte: O autor (2018).

A figura 76 apresenta micrografia da zona de transição do concreto V1, com alto teor de cinza volante, com 115 dias de idade e aumento de 4000x. Observa-se que neste caso, existe um refinamento maior da matriz, sem porosidade, quando comparado a zona de transição do concreto VP. É possível também perceber pequenas fissuras ao longo da zona de transição.

Figura 76 - Micrografia da zona de transição do concreto V1 (aumento 4000x).



Fonte: O autor (2018).

O espectro EDS (figura 77) para o local 1 da figura 76 indica oxigênio, silício e cálcio como principais elementos. De acordo com resultados da composição química (tabela 35) existem pequenas quantidades de alumínio, potássio, magnésio e a razão molar Ca/Si é 1,53. Assim, o local 1 pode ser provavelmente o produto de hidratação do cimento, composto principalmente por CSH, a partir da reação pozolânica.

Figura 77 - Espectro EDS do local 1.

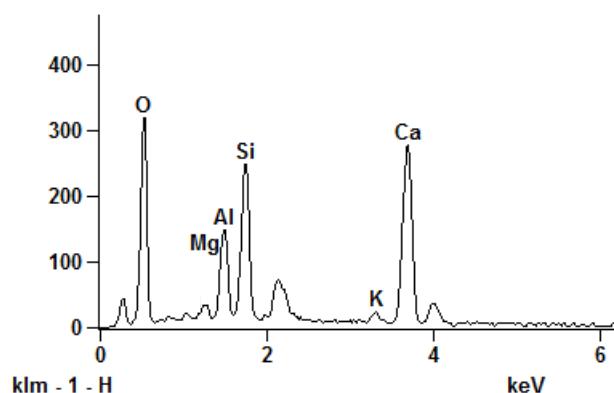


Tabela 35 - Análise química local 1.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
O	52,47
Si	10,95
Al	8,02
Ca	23,96
K	3,50
Mg	1,11

Fonte: O autor (2018).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Sobre a cinza volante verificou-se que, somente após a sua moagem, a mesma atendeu a todos critérios da NBR 12653 e pôde ser considerada como material pozolânico. Após moagem, a cinza volante se tornou mais fina, com 100% das partículas menores que 41 µm e mais reativa, com índice de pozolanicidade 12,8% maior.

O concreto com cinza moída apresentou menor índice de vazios, menor absorção de água e um refinamento maior da matriz, portanto mais resistente à migração de agentes agressivos. Também foi observada uma resistência mecânica à compressão 31,3% maior no concreto com cinza moída, quando comparado ao concreto com cinza comum. Com relação a temperatura de hidratação, ambos concretos com cinza volante apresentaram resultados similares, com temperaturas menores que o concreto padrão com cimento puro.

Por meio da análise estatística foi possível verificar que, tanto o fator porcentagem de cinza volante (%CV) como o fator relação a/c, afetaram a resistência média à compressão dos concretos para 28 e 115 dias de cura, embora o fator %CV seja mais determinante neste sentido.

O método do projeto fatorial possibilitou o cálculo de modelos de regressão, descrevendo, em função do fator %CV e da relação a/c, a resistência à compressão de concretos com altos teores de cinza volante para 28 e 115 dias de cura. Já o gráfico de contorno permite determinar, a partir de fatores pré-definidos, o valor mínimo de resistência mecânica à compressão, que pode ser definido conforme a necessidade do projeto.

O concreto da mistura V1, com 60% de teor de cinza volante, pode ser considerado concreto estrutural, uma vez que apresentou resistência mecânica à compressão de 33,4 MPa e módulo de elasticidade de 38,58 GPa.

Além disso o concreto V1 apresentou melhores propriedades físicas, térmicas e microestruturais que o concreto VP. O concreto V1 possui menor índice de vazios e menor absorção de água, portanto é mais resistente a migração de agentes agressivos. Apresentou menor temperatura de calor de hidratação, menor variação de temperatura ΔT e melhor condutividade térmica, o que ajuda a dissipar mais

rapidamente as temperaturas geradas durante o processo de calor de hidratação. A análise da microestrutura evidencia que o concreto V1 possui poucas microfissuras, quando comparado ao concreto VP, o que é resultado de melhores propriedades térmicas.

Sobre a análise numérica, o programa Abaqus pode ser considerado uma ferramenta adequada para realizar simulações térmicas em concretos, sendo que propicia o levantamento de informações que não seriam possíveis sem a utilização do mesmo.

Enfim, de forma geral, é possível afirmar que, o uso de altos teores de cinza volante, na elaboração de concretos estruturais, é viável do ponto de vista técnico. Podendo ser uma alternativa sustentável em diversos tipos de obra, afim de diminuir os impactos ambientais gerados pela indústria do cimento.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar a otimização do concreto V1, com 60% de cinza volante, com auxílio de aditivo super plastificante, diminuindo a relação a/c, afim de reduzir o consumo de aglomerante e melhorar as propriedades térmicas, físicas e microestruturais do mesmo.

Realizar estudo completo sobre a durabilidade do concreto V1, ou de uma mistura otimizada, considerando diversos mecanismos de deterioração, como por exemplo, lixiviação, expansão por ataque de sulfatos, expansão por reação álcali-agregado, despassivação da armadura por carbonatação e por ataques de cloretos, entre outros.

Medir outras propriedades mecânicas e térmicas do concreto V1, as quais não foram medidas nesta pesquisa, e realizar simulação termomecânica, através do programa Abaqus, afim de simular e entender melhor o comportamento termomecânico em concretos com alto teor de cinza volante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOLI, F. R.; SKWARCZYNSKI, T. M. **Concreto pré-refrigerado no Brasil: Uma evolução com mais de 20 anos.** São Paulo, 1989.

AL-MANASEER, A. ELIAS, N.; KAUFMAN, A. **Determining Methods to Control the Effects of Heat of Hydration and Other Concerns Associated with the Placement of Mass Concrete for Cast-in-Place Concrete Piling.** San Jose, California, 2007. Disponível em: <<http://www.dot.ca.gov>>. Acessado em setembro, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202:** Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. USA, 1997.

_____. **ASTM C 157:** Standard method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. USA, 1993.

_____. **ASTM C 618:** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, 2005.

ARULRAJAH A.; MOHAMMADINIA A.; HORPIBULSUK S.; SAMINGTHONG W. *Influence of class F fly ash and curing temperature on strength development of fly ash-recycled concrete aggregate blends.* **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 743-750, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. **NBR 7222:** Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 7224:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da área específica. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 8522:** Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8629:** Análise Granulométrica Carvão Mineral - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2008.

- _____. **NBR 9832:** Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio da resistência à penetração. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 9833:** Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 10342:** Concreto fresco - Perda de abatimento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014b.
- _____. **NBR 15575-4:** Desempenho de edificações habitacionais: Parte 4. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 15575-5:** Desempenho de edificações habitacionais: Parte 5. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.
- _____. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR NM 79:** Concreto – Preparação de concreto em laboratório. Rio de Janeiro, 1996.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos.** 2003. 1º ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2003.
- BENTZ D. P.; PELTZ M. A.; DURAN-HERRERA A.; VALDEZ P. ; JUAREZ C. A. *Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. Journal of Building Physics, USA*, p. 263-275, 2011.
- BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** Universidade Estadual de Campinas, 2005. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br>>. Acessado em novembro, 2017.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. **Planejamento de experimentos utilizando o Statistica.** Rio de Janeiro: E-papers, 2003.

CAMPITELI, V. C. **Alterações controladas dos concretos durante o andamento da obra.** In: ENTAC, V, 1993, São Paulo. Anais... EPUDP: São Paulo (1993).

CAMPITELI, V. C. **Controle de produção de concreto: práticas para alterações em serviço.** In: REIBRAC, 36, 1994, Porto Alegre. Anais... PUC: Porto Alegre (1994).

CARVALHO, J. **Análise de ciclo de vida ambiental aplicada a construção civil – Estudo de caso: Comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 2002.

CEZAR, D. S. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinas Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento.** 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. **Capítulo 8: Adições minerais. Concreto: Ciência e Tecnologia.** V. 1 v. São Paulo: Editora IBRACON, 2011.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica.** 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sumário mineral 2015.** Disponível em <<http://www.dnpm.org.br>>. Acessado em: maio, 2016.

ENGIE, Energia. Disponível em <<http://www.engieenergia.com.br>>. Acessado em novembro, 2017.

EFFTING, C. **Desenvolvimento de revestimentos cerâmicos confortáveis termicamente.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, A. Characterization of Fly Ashes: potential reactivity as alkaline cements. **Fuel.** v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003.

FUNGARO, D. A.; SILVA, M. G. Utilização de Zeólita Preparada a partir de Cinza Residuária de Carvão como Adsorvedor de Metais em Água. **Química Nova.** São Paulo, v. 25 n. 6b, p. 1081-1085, 2002. Disponível em <www.scielo.br/scielo.php>. Acessado em dezembro, 2018.

FURNAS. Departamento de Apoio e Controle Técnico. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** São Paulo: Pini, 1997.

GONÇALVES A. L.; SILVA E. C.; SANTOS J. W. V.; FARIAS H. L. H. M. S. Estudo técnico-financeiro de cimentos Portland: uma avaliação com diferentes marcas de cimento Portland. **Vetor**, v. 25, n. 1, p. 111-127, 2015.

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymers concrete**. Research Report GC1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, p. 103. 2005.

HOPPE, J. F. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: Mecanismo de hidratação, micro estrutura e carbonatação de concreto**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. São Paulo, 2008.

HOPPE J. F.; MEDEIROS M. H. F.; PEREIRA E.; HELENE, P. M.; ISAIA G. C. *High volume fly ash concrete with and without hydrated Lime: Chloride diffusion coefficient from accelerated test*. **Journal of Materials in Civil Engineering**, USA, v. 25, p. 411-418, 2013.

IGNJATOVIC I.; SAS Z.; DRAGAS J.; SOMLAI J.; KOVACS T. *Radiological and material characterization of high volume fly ash concrete*. **Journal of Environmental Radioactivity**, Serbia, v. xxx, p. 1-8, 2016.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, p.19 - 30, abril/junho 2004.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. V. 2. São Paulo: IBRACON, 2007.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. V. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. V. 2. São Paulo: IBRACON, 2011.

ISO 8301. **Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus**. Geneve, Switzerland, 1991.

KARL, T. R.; MELILO, J. M.; PETERSON T. C. **Global climate change impacts in the United States**. U.S. Global Change Research Program. Whashington, DC, 2009: Cambridge University Press. Disponível em <<https://downloads.globalchange.gov>>. Acessado em novembro, 2017.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade**. 1983. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

KIHARA, Y.; ZAMPIERI, V.A. **Microscopia eletrônica de varredura: perspectivas e potencialidade no aprimoramento da qualidade dos cimentos nacionais**. In: 38º

REUNIÃO DE TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, ago. 1988, São Paulo. Anais... ABCP: São Paulo (1988).

KHAN M. S.; ABBAS H. *Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete.* **KSCE Journal of Civil Engineering**, South Korean, v. 19, n. 6, p. 1825-1831, 2014.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. *A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete.* **Construction and Building Materials**, v. 20, p .744 – 753, 2006.

KOVTON M.; ZIOLKOWSKI M.; SHEKHOVTSOVA J.; KEARSLEY E. *Direct electric curing of alkali-activated fly ash concretes: a tool for wider utilization of fly ashes.* **Journal of Cleaner Production**, South Africa, v. 133, p. 220-227, 2016.

MET OFFICE. **Our changing climate - The current Science.** 2015. Disponível em <<http://www.metoffice.gov.uk/climate-guide>> Acesso em: 12 de maio, 2016.

MEHTA, P. K.; LANGLEY, W. S. *Monolith Foundation: Built to Last a 1000 Years,* **Concrete International**, v. 22, n. 7, p. 27-32, 2000.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, J. P. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 4^a ed. em Inglês. 2^a ed. em Português. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites.** v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009. Disponível em <www.sciencedirect.com>. Acessado em dezembro 2018.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

DASSAULT SYSTEMES, **Abaqus.** Disponível em <<https://www.3ds.com/>>. Acessado em novembro, 2017.

ONU. **2015 Revision of World Population Prospects.** Disponível em <<http://www.un.org>> Acessado em maio, 2016.

PARROT, L.J. *Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete.* **Materials and Structures**, v.29, n.187, p. 164-173, 1996.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Joinville, 2017.

RECENA, F. A. P. **Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta Com Emprego de Cinza Volante.** 2011. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil).

Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/36331>>. Acessado em dezembro, 2018.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. **CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth - Recommendation**. Materials and Structures Journal, Vol. 21, Number 126, p. 453 - 456, 1988.

SCHACKOW, A. **Propriedades de concretos contendo rejeitos particulados de tijolos de cerâmica vermelha**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Joinville, 2011.

SERRY, M. A., TAHA, A. S., EL-HEMALY, S. A. S., EL-DIDMONY, H.. Metakaolin lime hydration products. **Thermochimica Acta** 79, p. 103-110, 1984.

SHAFIGH P.; NOMELI M. A.; ALENGARAM J. U.; MAHMUD H.B.; JUMAAT M. Z. *Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash*. **Journal of Cleaner Production**, v.135, p. 148-157, 2016.

SILVA, M. G. **Cimentos Portland com Adições Minerais. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. V. 1. 2^a ed. atualizada e ampliada. Editora IBRACON. São Paulo, 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual 2013**. Disponível em <<http://www.snic.org.br>> Acessado em: maio, 2016.

TEODORO P. E.; FERREIRA M. H. Q.; CHARBEL D. S.; FORMAGINI S.; NEIVOCK M. P. Estimativa da taxa de redução de CO₂ de concretos produzidos com cinzas resíduas de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista de ciências exatas e tecnologia**. v. 8, n 8, p. 173-179, 2013.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Capítulo 36: Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1^a ed. V. 2. Editora IBRACON. São Paulo, 2011

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2013**. USA, 2013.

VOTORANTIM, **Cimentos**. Disponível em <<http://www.vcimentos.com.br>>. Acessado em junho, 2016.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **The cement sustainability initiative. Recycling concrete**. USA, 2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Toward a sustainable cement industry. Climate change**. USA, 2002.

WORLD COAL ASSOCIATION. **Coal facts 2015**. 2015. Disponível em: <http://www.worldcoal.org>. Acessado em janeiro, 2018.

WITZKE, F. **Propriedades de concretos estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC. Joinville, 2018.

YOUNSI A.; TURCRY P.; ROZIERE E.; AIT-MOKHTAR A.; LOUKILI A. *Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. Cement & Concrete Composites, France*, v. 33, p. 993-1000, 2011. o