



ESTUDO DA HETEROGENEIDADE DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA HIDRATAÇÃO

Giuseppe Ciaramella Moita

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Rio de Janeiro
Novembro de 2019

ESTUDO DA HETEROGENEIDADE DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA
HIDRATAÇÃO

Giuseppe Ciaramella Moita

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Aprovada por: Prof. Eduardo de Moraes Rego Fairbairn
Prof. Romildo Toledo Dias
Prof. Pierre Rossi

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 2019

Moita, Giuseppe Ciaramella

Estudo da heterogeneidade do concreto em função da hidratação/ Giuseppe Ciaramella Moita. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 116-121.

1. Concreto. 2. Calorimetria adiabático. 3. Ensaio Mecânicos. 4. Heterogeneidade. I. Fairbairn, Eduardo de Moraes Rego II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À Nair Albuquerque Moita
In memoriam

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha mãe e ao meu pai pelo amor e apoio incondicional durante a vida e, principalmente, durante o mestrado. Pelos conselhos dados em momento de aprendizado, ombros em momentos de desolação e afeto constante.

Aos meus avós Eunice, Libero e Nair pelo incentivo e preocupação com meus estudos.

Ao Dudu, meu orientador, por ter me acolhido em momento de dúvida e ter me guiado sempre com bons conselhos que permitiram um bom desenvolvimento da pesquisa e pela pessoa companheira que é.

Ao Romildo por ter me recebido no laboratório NUMATS, que nesse tempo me permitiu me desenvolver como profissional, pesquisador e pessoa, e por ter dado oportunidade de adquirir conhecimento além do oceano.

Ao Pierre pela ajuda no cronograma experimental e da análise de resultados do final da dissertação.

À Mônica, minha amiga de disciplinas e calorímetro adiabático, pela paciência e companhia durante essa trajetória. Somam-se a ela Amanda 2, Bruno e Pedro, meus amigos de balburdia e de sala, que gostaria de agradecer pela amizade, pela ajuda, pelas conversas que amenizaram a dureza da pesquisa e pelas discussões sobre pesquisa que tanto enriquecem nosso trabalho.

Um agradecimento especial à Amanda 1 e Gabi Puente que me ajudaram em momentos em que eu estava perdido na pesquisa, me permitindo encontrar um rumo.

À Nathalia por ser uma fonte constante de inspiração por sua luta, por seu sorriso e pela pessoa inspiradora que ela é.

Ao Lucas pela parceria dentro e fora do laboratório. À Tamara pela companhia nos estudos e nas cervejas na Alemanha.

Aos vários colegas de laboratório que em algum momento contribuíram para meu trabalho com artigos, experiências e conselhos: Yassin, Vanessa, Iolanda, Alfredo, Rayane, Victória, Yasmim, Vivian, Mayara e Carol. Também a todos os outros companheiros na jornada do mestrado.

Gostaria de agradecer a todo corpo administrativo do NUMATS, principalmente a Luzidelle, Ítalo, Ioná e Antonio Carlos pela solicitude em ajudar. À Claudinha pela simpatia e café diários.

Um agradecimento especial ao corpo técnico do NUMATS/LABEST pela ajuda. Ao Mauro e Marcelo, meus grandes companheiros de moldagem, pelo tempo, força, paciência e amizade com que vocês me ajudaram seja às 7 h da manhã ou as 20 h da noite. Ao Flavinho e Márcio pela solicitude. Ao Kleber, Adailton e Bruna pela ajuda nos ensaios realizados.

À Jaqueline do CETEM e ao Rangler do LTM pela e pelos respectivos laboratórios pela ajuda, apoio e infraestrutura oferecida.

À Isa e Fellipe, companheiros de primeiros momentos. E a todos aqueles que conheci durante essa jornada ou que me ajudaram de alguma forma nela.

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DA HETEROGENEIDADE DO CONCRETO EM FUNÇÃO DA HIDRATAÇÃO

Giuseppe Ciaramella Moita

Novembro/2019

Orientador: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Programa: Engenharia Civil

Visando complementar estudos de heterogeneidade do concreto e funcionar como base experimental para modelagem desse material em baixas idades, o presente trabalho conjugou ensaios calorimétricos e mecânicos de modo a relacionar propriedades mecânicas com hidratação e posteriormente avaliar a dispersão dos resultados obtidos. Corpos de prova foram produzidos e colocados em uma câmara de cura conectada ao calorímetro adiabático de modo que os corpos de prova tivessem o mesmo grau de hidratação. Realizou-se ensaios de compressão e flexão em 4 pontos em diversos tempos, associando os resultados à hidratação. Foram determinadas curvas de tendência a partir de *softwares* estatísticos que relacionavam o grau de hidratação às propriedades mecânicas (compressão, tração, módulo de elasticidade e deformação de pico). Com os mesmos *softwares* calculou-se a dispersão dos valores em relação à linha de tendência traçada (desvio médio quadrático absoluto e relativo) e em relação a eles mesmos (média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação). Os resultados mostraram que tanto as características mecânicas quanto os seus parâmetros estatísticos podem ser descritos através de curvas de tendências com alto grau de precisão. Ainda, conjugando resultados dos ensaios de pulso ultrassônico com calorimetria adiabática, obteve-se um patamar de percolação com grau de hidratação entre 8 e 11%. Finalmente, a dispersão (heterogeneidade) dos resultados se mostrou menor conforme o aumento do grau de hidratação, tanto utilizando parâmetros estatísticos absolutos quanto relativos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF CONCRETE HETEROGENEITY AS A FUNCTION OF ITS HYDRATION

Giuseppe Ciaramella Moita

November/2019

Advisor: Eduardo de Moraes Rego Fairbairn

Department: Civil Engineering

Aiming to complement concrete heterogeneity studies and to work as an experimental basis for modeling this material at early ages, the present work combined calorimetric and mechanical tests in order to relate mechanical properties with hydration and further evaluate the dispersion of the results obtained. Specimens were produced and placed in a curing chamber connected to the adiabatic calorimeter so that the specimens had the same degree of hydration. Compression and 4 point bending tests were performed at different times, associating the results with hydration. Trend curves were determined from statistical software that related the degree of hydration to mechanical properties (compressive and tensile strength, modulus of elasticity and peak deformation). The same software calculated the dispersion of the values in relation to the plotted trend line (absolute and relative mean squared error) and in relation to themselves (mean, standard deviation, variance and coefficient of variation). The results showed that both mechanical characteristics and statistical parameters can be described by trend curves with high degree of accuracy. In addition, by combining results of the ultrasonic pulse assays with adiabatic calorimetry, the hydration degree of the percolation threshold varied between 8 and 11%. Finally, the dispersion (heterogeneity) of the results was smaller as the hydration degree increased, using both absolute and relative statistical parameters.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo geral.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Contexto.....	4
1.4 Organização da dissertação.....	4
2. REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	6
2.1 Reagentes da Hidratação.....	6
2.1.1 Cimento Portland.....	7
2.1.2 Água	11
2.1.3 Aditivos	14
2.2 Transição de fases da pasta de cimento	15
2.2.1 Água na pasta de concreto endurecido	18
2.2.2 Poros.....	21
2.3 Reações de Hidratação.....	23
2.3.1 Mecanismo de hidratação	24
2.3.2 Liberação de calor e velocidade da reação.....	27
2.4 Grau de Hidratação	28
2.5 Modelo de hidratação de ULM e COUSSY (1995).....	30
2.5.1 Evolução do campo de temperatura e hidratação.....	31
2.5.2 Cinética da hidratação	32
2.5.3 Determinação da cinética de hidratação a partir da elevação adiabática de temperatura.....	34

2.6 Heterogeneidade do concreto.....	37
3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOSAGEM DO CONCRETO	43
3.1 Cimento (Aglomerante)	44
3.1.1 Massa específica.....	45
3.1.2 Granulometria e finura de blaine.....	46
3.1.3 Composição química	47
3.1.4 Resistência à compressão	49
3.1.5 Compacidade	51
3.2 Agregados naturais	53
3.2.1 Massa específica e absorção de água	54
3.2.2 Granulometria.....	57
3.2.3 Ensaio de compressão e vibração	59
3.2.4 Parâmetros “p” e “q”	61
3.3 Dosagem do Concreto.....	63
4 MÉTODOS DE ENSAIO.....	64
4.1 Métodos de ensaios calorimétricos	64
4.2 Métodos de ensaios mecânicos	71
4.3 Métodos de análise dos resultados mecânicos	73
4.4 Métodos de análise do patamar de percolação.....	75
4.5 Métodos de análise estatística.....	75
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	77
5.1 Calorimetria adiabática	77
5.2 Ensaio de compressão axial	86
5.2.1 Hidratação completa.....	86
5.2.2 Resistência à compressão x Hidratação	88
5.2.3 Deformação de pico x Hidratação	96
5.2.4 Módulo de elasticidade x Hidratação	102

5.3 Ensaio de flexão com 4 pontos	107
5.3.1 Resistência à compressão x Hidratação	107
5.4 UCA	112
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6.1 Conclusões	114
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICE A: DOSAGEM DO CONCRETO ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> <i>BETONLAB PRO 3</i>	122
A.1 Banco de dados de constituintes	122
A.2 Calibração dos parâmetros “p” e “q”	133
A.3 Dosagem do concreto.....	135
APÊNDICE B: MÓDULO DE ELASTICIDADE (ENSAIO DE FLEXÃO) X HIDRATAÇÃO.....	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios do desenvolvimento tecnológico do concreto através da resistência da argamassa (HEWLETT, 2004)	1
Figura 2 - Evolução da produção de cimento no mundo (CEMBUREAU, 2016)	2
Figura 3 - Resultados experimentais relativos a relação entre o fator água-cimento e a resistência a compressão (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015)	12
Figura 4 - Curva tensão deformação para o concreto com diferentes fatores água-cimento (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015)	13
Figura 5 - Distribuição do tamanho dos poros em pastas de cimento hidratado (MEHTA; MONTEIRO, 2006)	14
Figura 6 - Evolução esquemática da retração autógena como função do grau de hidratação (SILVA 2007 adaptado de ACKER 1988)	16
Figura 7 - Taxas típicas de formação de produtos de hidratação em um cimento portland comum (MEHTA; MONTEIRO, 2006)	16
Figura 8 - Influência da formação de produtos de hidratação no tempo de endurecimento, porosidade, permeabilidade e resistência da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006)	17
Figura 9 – Representação esquemática das noções da teoria de percolação segundo ACKER (SILVA, 2007)	18
Figura 10 - Balanço volumétrico da reação de hidratação. CS: retração química. Vcap: água capilar. Vg: água gel. Vs: produtos sólidos da hidratação. Vc: cimento. (MEHTA; MONTEIRO, 2006)	19
Figura 11 - Modelo de FELDMAN e SEREDA (1968)	20
Figura 12 – Modelo adaptado de SIERRA (1974) apud BAROGHEL-BOUNY (1994)	21
Figura 13 - Relação volumétrica entre produtos e reagentes da hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2010)	22
Figura 14 - Variação da porosidade com o tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2006)	22
Figura 15 - Evolução da reação de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2006)	24
Figura 16 - Evolução da montagem de fases para um sistema de clínquer de laboratório (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015)	26
Figura 17 - Estágios do processo de hidratação (FARIA, 2004)	28

Figura 18 - Evolução do modo de elasticidade em função do grau de hidratação. HPC: concreto de alta performance. OC: concreto comum. (ULM; COUSSY, 1996).....	31
Figura 19 - Elevação adiabática com diversas temperaturas iniciais (FAIRBAIRN, 2001).....	33
Figura 20 - Evolução da reação de hidratação (adaptado de ULM; COUSSY, 1995)...	33
Figura 21 - Elevação adiabática de temperatura em função do tempo (ULM e COUSSY, 1996).....	35
Figura 22 - Afinidade normalizada em função da hidratação (ULM e COUSSY, 1996)	36
Figura 23 - Estrutura de grão gerada pelo modelo (SCHLANGEN; VAN MIER, 1992).	39
Figura 24 - Distribuição normal de resistência das barras (SCHLANGEN e VAN MIER, 1992).....	40
Figura 25 - Gráfico força-deformação obtido pelo modelo probabilístico (ROSSI et al.,1996).....	41
Figura 26 - Padrão de fratura obtido pelo modelo probabilístico (ROSSI et al.,1996)..	41
Figura 27 - CP II - E	45
Figura 28 - Picnometro de vidro.....	45
Figura 29 - Equipamento de granulometria à laser: Malvern Mastersizer	46
Figura 30 - Distribuição do tamanho de partículas do cimento.....	47
Figura 31 - Equipamento de finura de Blaine	47
Figura 32 - Pressão por compressão	48
Figura 33 - Shimadzu EDX-720	48
Figura 34 - Preparação (a) e rompimento (b) da argamassa de cimento	50
Figura 35 - Ensaio de índice de consistência da massa de cimento	51
Figura 36 - Estado capilar (máximo empacotamento das partículas).....	52
Figura 37 - Agregados utilizados: areia (a) e brita 0 (b)	53
Figura 38 - Pilhas de homogeneização da areia (a) e brita 0 (b)	54
Figura 39 - Quarteador de Jones.....	57
Figura 40 - Ro-tap	57
Figura 41 - Curva granulométrica dos agregados.....	58
Figura 42 - Ensaio de Compressão e Vibração	60
Figura 43 - Calorímetro adiabático (a) esquema em corte; (b) foto do calorímetro.....	65

Figura 44 - Preparação da câmara interna (a) câmara interna; (b) revestimento de isopor; (c) lubrificação do recipiente; (d) saco para recebimento do concreto.....	66
Figura 45 – Moldagem (a) concreto vibrado; (b) tubo metálico com óleo; (c) encaixe do tubo; (d) câmara interna pronta para ser fechada	67
Figura 46 - Fechando o calorímetro adiabático (a) tampa do calorímetro; (b) câmara interna sendo fechada	68
Figura 47 - Tanque de água ligado ao calorímetro (a) vista externa; (b) vista interna...	69
Figura 48 - Revestimento dos corpos de prova com (a) papel filme e (b) fita crepe	70
Figura 49 – Corpo de prova antes (a) e durante (b) o ensaio de compressão	71
Figura 50 – Corpo de prova durante o ensaio de flexão	72
Figura 51 - Corpo de prova de flexão antes (a) e após (b) ensaio	72
Figura 52 - Equipamento para aquisição de dados para o ensaio de pulso ultrassônico	75
Figura 53 - Elevação adiabática do concreto	78
Figura 54 - Comparativo entre curvas adiabáticas de diferentes temperaturas iniciais..	78
Figura 55 - Elevação adiabática para diferentes temperaturas iniciais (escala linear) ...	79
Figura 56 - Elevação adiabática para diferentes temperaturas iniciais (escala logarítmica).....	79
Figura 57 - Elevação adiabática em diferentes temperaturas iniciais nas primeiras horas	80
Figura 58 - Calorimetria isotérmica $T_i = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	81
Figura 59 – Pontos de correção das curvas de elevação adiabática.....	83
Figura 60 - Elevações adiabáticas corrigidas (escala linear)	83
Figura 61 - Elevações adiabáticas corrigidas (escala logarítmica).....	84
Figura 62 - Comparativo entre curvas adiabáticas de diferentes temperaturas iniciais corrigidas	85
Figura 63 - Relação entre a temperatura inicial e temperatura corrigida na calorimetria adiabática	86
Figura 64 - Relação entre grau de hidratação e resistência à compressão relativa.....	88
Figura 65 - Relação entre desvio quadrático médio da resistência à compressão com grau de hidratação médio dos clusters	90
Figura 66 – Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo da resistência à compressão com grau de hidratação médio	91
Figura 67 - Relação hidratação e resistência à compressão relativa corrigida	93
Figura 68 - Relação entre a hidratação e média da compressão relativa nos clusters	95

Figura 69 - Relação entre a hidratação e o desvio padrão da compressão relativa nos clusters	95
Figura 70 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação dentro dos clusters	96
Figura 71 - Relação entre grau de hidratação e deformação de pico.....	97
Figura 72 - Curva tensão deformação de espécimes de diferentes clusters.....	98
Figura 73 - – Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo da deformação de pico com grau de hidratação médio	99
Figura 74 - Relação entre grau de hidratação e deformação de pico relativa corrigida	100
Figura 75 - Relação entre hidratação e média da deformação de pico relativa no cluster	101
Figura 76 - Relação entre hidratação e desvio padrão da deformação de pico relativa no cluster	101
Figura 77 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação da deformação de pico dentro dos clusters	102
Figura 78 - Relação entre grau de hidratação e módulo de elasticidade relativo	103
Figura 79 - Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo do módulo de elasticidade com grau de hidratação médio	105
Figura 80 - Relação entre hidratação e o módulo de elasticidade relativa corrigida....	105
Figura 81 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação do módulo de elasticidade dentro dos clusters	106
Figura 82 - Relação entre grau de hidratação e resistência à tração relativa.....	107
Figura 83 - Relação entre desvio quadrático médio com grau de hidratação médio dos clusters.....	109
Figura 84 - Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo com grau de hidratação médio.....	109
Figura 85 - Relação entre grau de hidratação e a resistência a tração relativa corrigida	110
Figura 86 - Relação entre hidratação e média da resistência à tração relativa no cluster	111
Figura 87 - Relação entre hidratação e desvio padrão da resistência à tração relativa no cluster	111
Figura 88 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação da resistência a tração dentro dos clusters	112
Figura 89 - Resultado do ensaio UCA.....	113

Figura 90 - Banco de dados de constituintes	122
Figura 91 - Seleção de cimento como constituinte.....	123
Figura 92 - Nomeação do cimento	124
Figura 93 - Constituição do cimento	124
Figura 94 - Características principais do cimento	125
Figura 95 - Granulometria do cimento	125
Figura 96 - Propriedades experimentais de empacotamento do cimento	126
Figura 97 -Resultado do software para granulometria do cimento	126
Figura 98 - Seleção de brita como constituinte	127
Figura 99 - Nomeando a brita.....	127
Figura 100 - Propriedades da brita	128
Figura 101 - Granulometria da brita	128
Figura 102 - Propriedades experimentais de empacotamento da brita.....	129
Figura 103 - Resultado do software para granulometria da brita	129
Figura 104 - Seleção de areia como constituinte.....	130
Figura 105 - Nomeando a areia	130
Figura 106 - Propriedades da areia	131
Figura 107 - Granulometria da areia.....	131
Figura 108 - Propriedades experimentais de empacotamento da areia	132
Figura 109 - Resultado do software para granulometria da areia.....	132
Figura 110 - Calibração dos agregados	133
Figura 111 - Seleção dos constituintes	133
Figura 112 - Colocando dados para calibração	134
Figura 113 - Selecionar que nenhum parâmetro será imposto	134
Figura 114 - Resultado de parâmetros.....	135
Figura 115 - Selecionando constituintes da mistura.....	135
Figura 116 - Escolha de propriedades a serem fornecidas pelo programa	136
Figura 117 - Resultado da dosagem	137
Figura 118 - Relação entre grau de hidratação e módulo de elasticidade (LVDT inferior)	138
Figura 119 - Relação entre grau de hidratação e módulo de elasticidade (LVDT superior).....	139
Figura 120 - Módulo de elasticidade absoluto do concreto em relação a hidratação...	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Notação utilizada na química do cimento	8
Tabela 2 - Composição do cimento Portland.....	11
Tabela 3 - Microestrutura multiescala de materiais à base de cimento	38
Tabela 4 - Diâmetro em micrômetros (μm).....	46
Tabela 5 - Composição química do cimento CII-E.....	49
Tabela 6 - Resistência à compressão do cimento (MPa).....	50
Tabela 7 - Resultado da compactação experimental	53
Tabela 8 - Propriedades físicas dos agregados	56
Tabela 9 - Característica granulométrica da brita 0.....	58
Tabela 10 - Característica granulométrica da areia	59
Tabela 11 - Resultados do ensaio de compactação	61
Tabela 12 - Composição dos traços para calibração dos parâmetros "p" e "q"	62
Tabela 13 - Resistência a compressão para calibração dos parâmetros "p" e "q"	62
Tabela 14 - Resultados dos parâmetros "p" e "q"	62
Tabela 15 - Dosagem do cimento	63
Tabela 16 - Resistência a compressão da dosagem	63
Tabela 17 – Parâmetros estatísticos das elevações adiabáticas com e sem correção	84
Tabela 18 - Parâmetros estatísticos dos resultados de compressão máxima do concreto	87
Tabela 19 - Divisão de clusters de compressão	89
Tabela 20 - Parâmetros estatísticos da resistência a compressão relativa nos clusters ..	92
Tabela 21 - Parâmetros estatísticos de variação do grau hidratação nos clusters	93
Tabela 22 - Parâmetros estatísticos da resistência a compressão relativa corrigida dentro dos clusters	94
Tabela 23 - Parâmetros estatísticos da dispersão da deformação relativa em relação a linha de tendência	98
Tabela 24 - Parâmetros estatísticos da deformação corrigida pela hidratação nos clusters	100
Tabela 25 - Parâmetros estatísticos da dispersão do módulo de elasticidade em relação a linha de tendência	104
Tabela 26 - Parâmetros estatísticos do módulo corrigido pela hidratação nos clusters	106

Tabela 27 - Divisão de clusters do ensaio de flexão em 4 pontos	108
Tabela 28 - Parâmetros estatísticos da resistência a tração corrigida nos clusters	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A utilização de materiais cimentícios na construção de edificações remete à Idade Antiga, havendo registros do uso deles por egípcios, gregos e romanos. O desenvolvimento do protótipo do cimento Portland ocorreu apenas em 1824 por Joseph Aspdin, já o do cimento como é utilizado atualmente foi em 1845 por Isaac Johnson. O primeiro foi responsável pela calcinação de argila e calcário e o segundo pela adição de gesso na mistura (NEVILLE & BROOKS, 2010).

A partir de então houve um desenvolvimento rápido do cimento e também do seu modo de produção e a melhoria dos fornos, onde é feita a calcinação aumentando significativamente a qualidade do material produzido. Pesquisas científicas sobre as características do material se iniciaram no final do século XIX, resultando numa melhoria das propriedades, principalmente da resistência, através do controle de qualidade. Essa evolução pode ser observada na Figura 1 (HEWLETT, 2004).

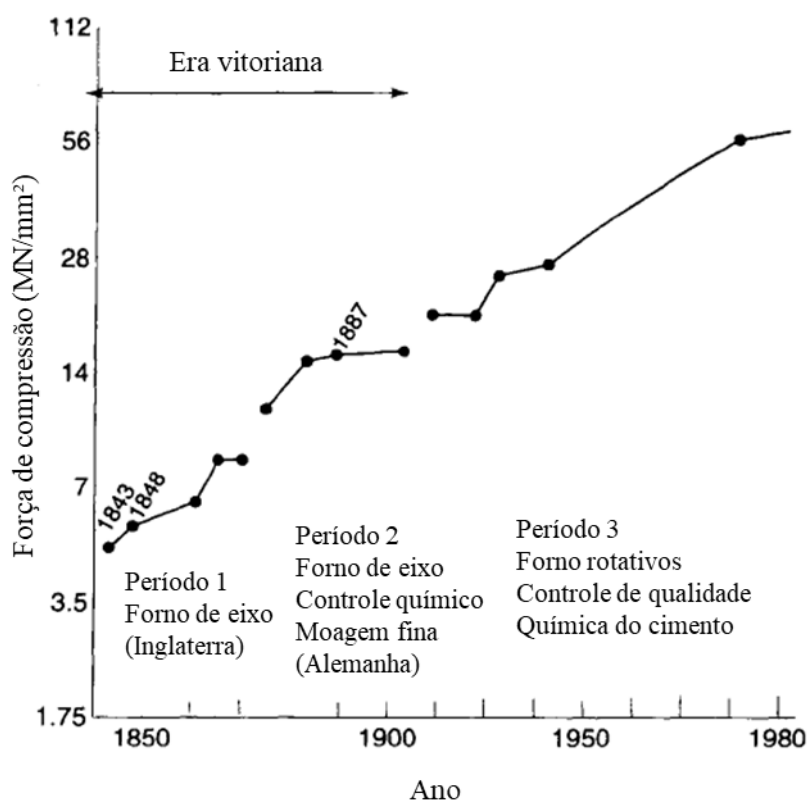


Figura 1 - Estágios do desenvolvimento tecnológico do concreto através da resistência da argamassa (HEWLETT, 2004)

A produção e utilização de cimento aumentaram constantemente até os dias atuais. A Figura 2 mostra o crescimento dessa produção nos últimos anos, uma tendência que deve continuar. Segundo CEMBUREAU (2016), no mundo são fabricados anualmente 4,6 bilhões de toneladas de cimento.

A produção de cimento serve principalmente como índice da utilização de concreto, que, segundo MEHTA e MONTEIRO (2006), é o material estrutural mais utilizado do mundo. O concreto estrutural é a mistura homogênea de cimento, água, agregados e, possivelmente, aditivos, de modo que é possível relacionar a fabricação do cimento com a do próprio concreto.

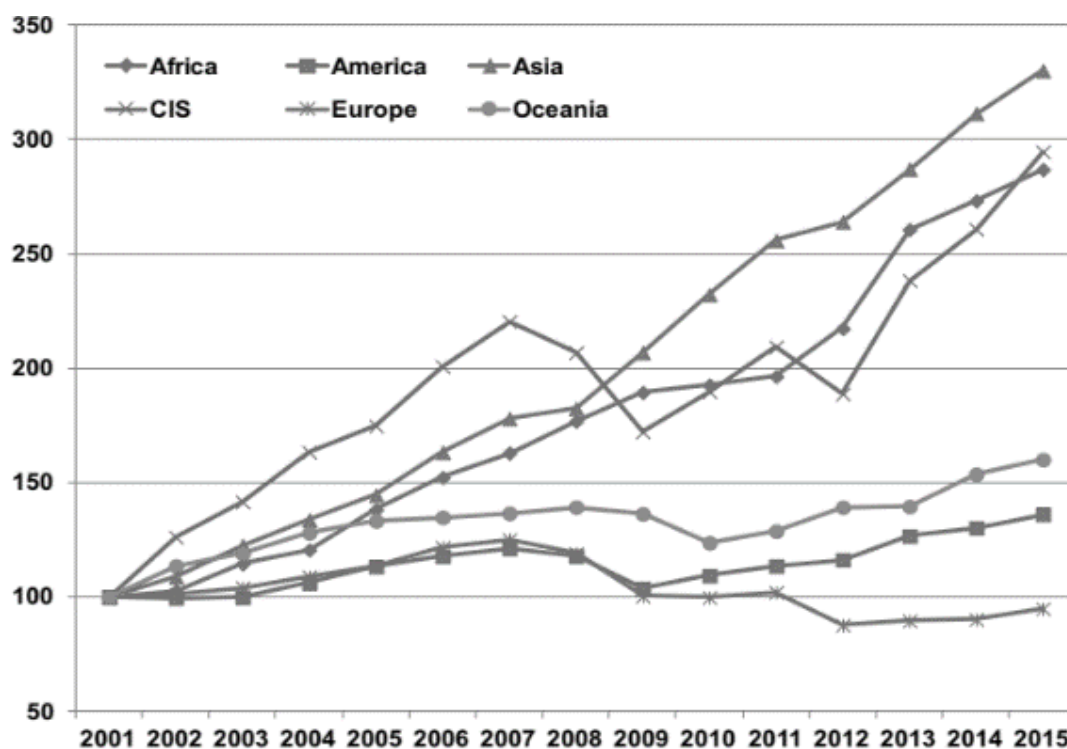


Figura 2 - Evolução da produção de cimento no mundo (CEMBUREAU, 2016)

Vários são os motivos pelos quais o concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, como a resistência a ambiente agressivo, a grande possibilidade de moldar esse material na forma desejada e a facilidade de encontrar matérias primas e mão de obra para execução (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

A maior preocupação com o aquecimento global e escassez de recursos, juntamente com a constante procura por redução de custos, aumentou o interesse pelo concreto como material de grande uso. Em resposta a isso, tem-se procurado alternativas para reduzir o uso do concreto e também o impacto ambiental causado pela sua produção. As principais soluções dadas consistem principalmente em otimizar a cadeia de produção do cimento e também substituí-lo parcialmente por aditivos minerais (KAJASTE; HURME, 2016).

A melhor utilização possível de um material passa pelo conhecimento de suas propriedades e características, assim como de seu processo de fabricação. Diversos grupos de pesquisa vêm avançando constantemente na compreensão da hidratação do cimento, porém, apesar disso, continua a existir diversas incógnitas a serem descobertas (SCRIVENER; NONAT, 2011).

Grupos de pesquisadores têm desenvolvido também modelos probabilísticos que simulam computacionalmente a fratura do concreto. Dentre esses se destacam o do LCPC - Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées, em Paris, proposto por TAILHAN; PONT & ROSSI (2010) e da Universidade de Delft, na Holanda, proposto por SCHLANGEN & VAN MIER (1992).

Esses modelos têm como base o conceito da heterogeneidade do concreto, como material, devido aos diferentes tamanhos de agregados, existência de poros após a hidratação e aos fenômenos da secagem e retração que contribuem para a existência dessa propriedade (ROSSI; RICHER, 1987). Essa característica influencia diretamente na formação e propagação de fissuras assim como na fratura final do corpo de concreto (TORRENTI et al., 1991).

Apesar do vasto estudo desses grupos (ROSSI; RICHER, 1987; SCHLANGEN; VAN MIER, 1992) sobre o tema, existem alguns aspectos que ainda precisam ser mais estudados para a complementação do modelo probabilístico, entre eles a hidratação. As pesquisas citadas acima utilizaram concreto com 28 dias de cura para os testes, de modo que a hidratação já é considerada completa para atingir a resistência desejada de uso. Desse modo, o estudo da heterogeneidade do concreto em diferentes graus de hidratação poderá ajudar no desenvolvimento de modelos mais precisos, principalmente para concretos em poucas idades.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Determinar as distribuições estatísticas da resistência à compressão e tração para diversos graus de hidratação, situando a análise dentro do quadro do modelo probabilístico de fissuração de ROSSI & TAILHAN (2010).

1.2.2 Objetivos específicos

Definir parâmetros da dosagem ideal do concreto para análise da distribuição estatística dos resultados;

Obter a curva calorimétrica do concreto com o traço desejado;

Moldar corpos de prova e romper no tempo estipulado de acordo com o grau de hidratação determinado;

Observar diferenças de distribuições estatísticas de resultados para diversos níveis de hidratação.

1.3 Contexto

A retomada do desenvolvimento de modelos probabilísticos, agora relacionados a concretos em baixas idades, traz novamente a necessidade de se estudar a heterogeneidade do concreto. As teses de doutorado em andamento pelo PEC/COPPE/UFRJ do aluno Magno Teixeira Mota de título provisório “Implementação de modelo probabilístico para concreto a poucas idades” e da aluna Mariane Rodrigues Rita de título provisório “Implantação de um modelo probabilístico de fissuração utilizando estratégias de paralelização” foi então complementada por um trabalho experimental, permitindo a comparação com resultados analíticos obtidos através da modelagem.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação de mestrado está dividida em 6 capítulos:

Introdução - É apresentado um breve histórico do concreto, ressaltando o desenvolvimento científico tecnológico desse percurso, assim como a importância do concreto nos dias atuais. Termina mostrando os desafios que a ciência tem pela frente, com ênfase na modelagem de estruturas de concreto com baixas idades. Define ainda os objetivos e a estrutura da pesquisa.

Reação de hidratação do Cimento Portland - Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura sobre os reagentes da reação de hidratação, a mudança das características físicas da mistura, a reação de hidratação e o grau de hidratação do concreto. Por último, são abordados o modelo de hidratação de Ulm e Coussy e conceitos básicos sobre a heterogeneidade do concreto em diferentes níveis e como ela atua na mecânica da fratura do material.

Caracterização dos materiais e dosagem do concreto - São descritos os procedimentos empregados para a caracterização das matérias primas a serem utilizadas para a produção dos concretos, juntamente com os resultados obtidos neles. Por fim, utilizando-se esses dados, é apresentado o resultado da dosagem.

Métodos de ensaio e análise – O capítulo apresenta os métodos de ensaio da calorimetria adiabática do concreto, assim como os procedimentos utilizados para a moldagem, desmoldagem, preparação das amostras e ensaios mecânicos do material. Por último, são apresentados os métodos estatísticos de análise dos resultados.

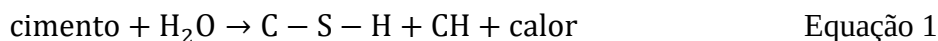
Apresentação e análise dos resultados - São apresentados os resultados dos ensaios realizados nos concretos em seus diversos graus de hidratação e é feita a discussão e análise dos resultados obtidos, separando em calorimetria e ensaios mecânicos.

Conclusão - Abrange as conclusões do estudo realizado, avaliando se os objetivos foram atingidos e apontando sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, é apresentado, no apêndice, de forma detalhada o modo de dosagem de concretos através do programa *Betonlab Pro 3*

2. REAÇÃO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

A reação entre o cimento Portland e a água, também chamada de hidratação do cimento, pode ser simplificada a partir da equação 1, na qual essa mistura formará silicato hidratado de cálcio (C-S-H) e hidróxido (CH) de cálcio e liberará calor.



Apesar de resumir em parte a reação, essa equação não representa toda a complexidade por trás da hidratação do cimento Portland. Vários são os componentes do cimento e os hidratos formados, sendo o C-S-H o principal responsável pela resistência do cimento hidratado. Existe também a possibilidade de misturas com aditivos minerais ou químicos que influenciarão a reação.

O fato da reação ser exotérmica, libera calor, e termoativada, tem sua velocidade aumentada pela temperatura, adiciona uma complexidade a sua cinética, tornando o estudo dessa preponderante para o entendimento da hidratação do cimento Portland.

Levando em conta as diversas complexidades da reação de hidratação do cimento Portland, alguns conceitos serão apresentados para sua completa compreensão. Serão esses: os reagentes participantes da reação, a mudança de estado que ocorre durante a hidratação, a própria reação de hidratação levando em conta o mecanismo e a liberação de calor e o grau de hidratação.

Por último, será apresentado um modelo de hidratação desenvolvido por ULM e COUSSY (1995), importante para a modelagem da reação, apontada na Equação 1, que será utilizada no trabalho e um breve retrato sobre a heterogeneidade do concreto.

2.1 Reagentes da Hidratação

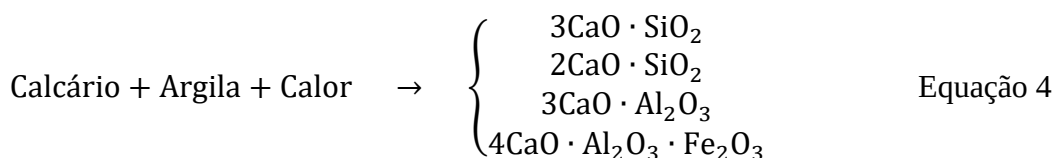
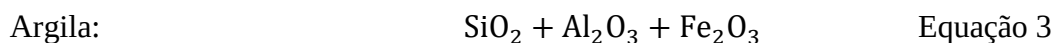
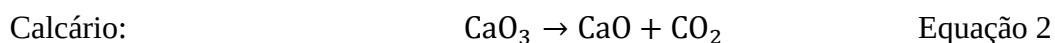
A reação de hidratação do concreto e/ou pasta de cimento ocorre entre a água e o cimento, podendo também, na mistura, haver aditivos que participarão desse processo. Simplificando, considera-se que os agregados graúdos e miúdos são inertes nas reações químicas ocorridas. Para a melhor compreensão da hidratação torna-se, então, necessário o conhecimento das características dos reagentes.

2.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material produzido a partir do produto da moagem do clínquer misturado com uma pequena quantidade de gesso. Clínquer são pequenos grãos de 5 a 25 mm de diâmetro, formados a partir do aquecimento de uma mistura de calcário e argila a uma temperatura aproximada de 1450 °C até a ocorrência da fusão parcial (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Nesse processo de formação do clínquer, a argila e o calcário são moídos antes do aquecimento até que formem um pó bastante fino, devendo-se misturar ambos até homogeneização para que sejam colocados no forno. Posteriormente, conforme o aquecimento da mistura, ocorrerá a sinterização gradual e fusão parcial, formando posteriormente o clínquer (NEVILLE; BROOKS, 2010).

O aquecimento do calcário (CaCO_3) resulta na sua decomposição em cal (CaO) que permanece no forno e de gás carbônico (CO_2) liberado no ar. Na argila está contida uma mistura dos óxidos de sílica (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3) e outros em menor quantidade. O equilíbrio do calcário e da argila produzirá então os seguintes componentes constituintes do cimento Portland: silicato tricálcico ou alita ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato dicálcico ou belita ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), entre outros. Além disso, ainda há a gipsita ou gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) adicionado após a moagem (MEHTA; MONTEIRO, 2006).



O estudo específico do cimento utiliza abreviações distintas da utilizada na química convencional, para facilitar a compreensão, na Tabela 1 é possível observar os compostos, suas fórmulas químicas e abreviações.

Tabela 1 - Notação utilizada na química do cimento

Composto	Fórmula	Abreviação
Óxido de cálcio (cal)	CaO	C
Óxido de sílica	SiO ₂	S
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	A
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	F
Óxido de magnésio	MgO	M
Óxido de sulfato	SO ₃	$\bar{S}$
Água	H ₂ O	H
Silicato tricálcico ou Alita	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcico ou Belita	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Gipsita	CaSO ₄ ·2H ₂ O	C $\bar{S}$ H ₂

Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Cada um dos principais compostos do cimento Portland apresentados anteriormente influencia diretamente as propriedades da mistura, podendo-se utilizar diferentes proporções de cada um deles para fabricar um cimento com determinadas características desejadas para a pasta ou para o concreto.

Os silicatos de cálcios são os principais responsáveis pela resistência do concreto, devido a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) a partir deles, desejando-se assim que existam em maior quantidade na mistura. A alita, constitui de 50% a 70% do clínquer e é produzida por uma reação rápida, sendo principal responsável pela resistência nos primeiros 28 dias e também e, uma grande liberação de calor. Já a belita compõe de 15% a 30% e, diferentemente da alita, tem sua produção desacelerada, contribuindo pouco para resistência inicial (NEVILLE; BROOKS, 2010; TAYLOR, 1990).

O aluminato forma 5% a 10 % do clínquer e assim como a alita é produzida por uma reação rápida podendo ser prejudicial ao processo de hidratação de modo que a adição de gesso visa retardá-la. O C_3A gera efeitos positivos e negativos para a pasta de cimento, por um lado seu impacto na resistência se limita apenas a primeiras idades e permite o aumento dos danos causados por ataques de sulfatos, por outro lado favorece a reação dos óxidos de cálcio e sílica (NEVILLE; BROOKS, 2010; TAYLOR, 1990).

Por último, o ferroaluminato compõe de 5% a 15% do clínquer tendo sua velocidade de reação dependente da proporção entre o alumínio e ferro da mistura. Apesar da baixa quantidade, influencia principalmente na velocidade da reação, fazendo-se necessária a presença da gipsita, que permite aumentar o tempo anterior ao início da hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2010; TAYLOR, 1990).

A relação entre as características dos constituintes e seus compostos torna importante o conhecimento da quantidade de cada um deles na mistura. As equações de Bogue permitem o cálculo teórico aproximado dos componentes do cimento Portland a partir dos elementos nele presente, que pode ser obtido através de métodos analíticos (MEHTA; MONTEIRO, 2006):

$$\%C_3S = 4071C - 7,600S - 6,718A - 2,850\bar{S} \quad \text{Equação 5}$$

$$\%C_2S = 2867S - 0,7544 C_3S \quad \text{Equação 6}$$

$$\%C_3A = 2650A - 1,692F \quad \text{Equação 7}$$

$$\%C_4AF = 3,043F \quad \text{Equação 8}$$

Apesar de nas equações de Bogue serem considerados apenas os óxidos principais utilizados para a fabricação do clínquer, é comum a existência de impurezas na mistura como magnésio, sódio, potássio e enxofre. Em pequenas quantidades, esses elementos não afetam as reações básicas da produção de clínquer, participando apenas da estrutura cristalina dos principais componentes, porém em maior quantidade eles devem ser considerados para a composição (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Outro fator capaz de modificar as características do cimento é seu índice de finura, quanto mais fino, mais rápida será a reação, assim maior quantidade de calor é

emitida. Desse modo, grãos mais finos permitem uma resistência inicial maior em menos tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além do clínquer moído e do gesso, podem haver outros componentes no cimento chamados de adições, que modificam algumas de suas características. Por esse motivo, existem normas que determinam as quantidades máximas e mínimas possíveis de cada um deles na mistura. Exemplos de adições são: escória de forno, materiais pozolânicos, cinza volante, etc (HEWLETT, 2004).

A quantidade dos componentes, juntamente com adições e índice de finura, influencia as características do cimento. Com isso, no Brasil existem cinco diferentes tipos de cimentos Portland segundo a Associação Nacional de Normas Técnicas (ABNT), esses cimentos se diferenciam em diversas formas, tanto na composição dos componentes quanto na existência de aditivos minerais no mesmo.

Cada um desses cimentos tem propriedades específicas e deve ser utilizado de acordo com o que se deseja do concreto. O primeiro cimento a ser produzido no Brasil foi o cimento Portland comum, ou CP I, sem aditivos minerais. Com o desenvolvimento tecnológico dos aditivos passaram a ser produzidos também cimentos compostos, com adições de escória, material pozolânico ou material carbonático, chamado CP II. A partir de então esse novo tipo de cimento se popularizou, tornando-se o mais produzido no país (ABCP, 2002).

Cimentos com escórias de alto forno e pozolânicos foram uma solução para a redução da energia gerada pelos fornos na produção do clínquer. Além disso, eles modificam a microestrutura do concreto, permitindo uma maior durabilidade do concreto no futuro e também retardando a reação de hidratação (ABCP, 2002).

Por último, visando um cimento que fosse resistente com pouca idade, modificou-se a dosagem de argila e calcário e fez-se uma moagem mais fina do clínquer de modo que a reação com a água fosse mais rápida (ABCP, 2002). Na Tabela 2 é possível visualizar a composição e nomenclatura de cada um dos tipos de cimento produzidos no Brasil, de acordo com sua respectiva norma, a (ABCP, 2002).

Tabela 2 - Composição do cimento Portland

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)			
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto forno (E)	Material pozolânico (Z)	Material carbonático (F)
Comum	CP I	100 – 95	0 – 5		
	CP I - S	94 - 90	-	-	6 - 10
Composto	CP II – E	94 - 51	6 - 34	-	0 - 15
	CP II – Z	94 - 71	-	6 - 14	0 - 15
	CP II – F	89 - 75	-	-	11 - 25
Alto-Forno	CP III	65 - 25	35 - 75	-	0 - 10
Pozolânico	CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 10
Alta Resistência Inicial (ARI)	CP V - ARI	100 - 90	-	-	0 - 10

Fonte: NBR 16697 (2018)

2.1.2 Água

A água é um reagente essencial para a hidratação do cimento e seu estudo, tornando importante os seus efeitos no concreto. Para que haja a reação completa do cimento Portland com a água é necessária que ela esteja em quantidade suficiente e que a mistura dos dois componentes seja bem-feita. Desse modo, o fator água-cimento é um aspecto importante para o estudo da hidratação.

METHA e MONTEIRO (1994) afirmam que o fator água-cimento de 0,32 geraria um cimento completamente hidratado e sem porosidade, ou seja, toda a água seria utilizada para o processo químico desejado. Já TAYLOR (1997) afirma que a maioria dos pesquisadores considera o valor de 0,38 como valor limite para que ocorra a hidratação

de toda a pasta de cimento. Assim, para uma hidratação completa é necessário um fator água-cimento superior a esses valores apresentados.

Várias as características do concreto fresco e endurecido que podem ser relacionados ao fator água-cimento da mistura. É possível fazer a correlação do fator com a resistência do concreto à compressão, que se mostraram inversamente proporcionais em diversas pesquisas, que tem seus resultados apontados no gráfico da Figura 3 (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015; SINGH; MUNJAL; THAMMISHETTI, 2015).

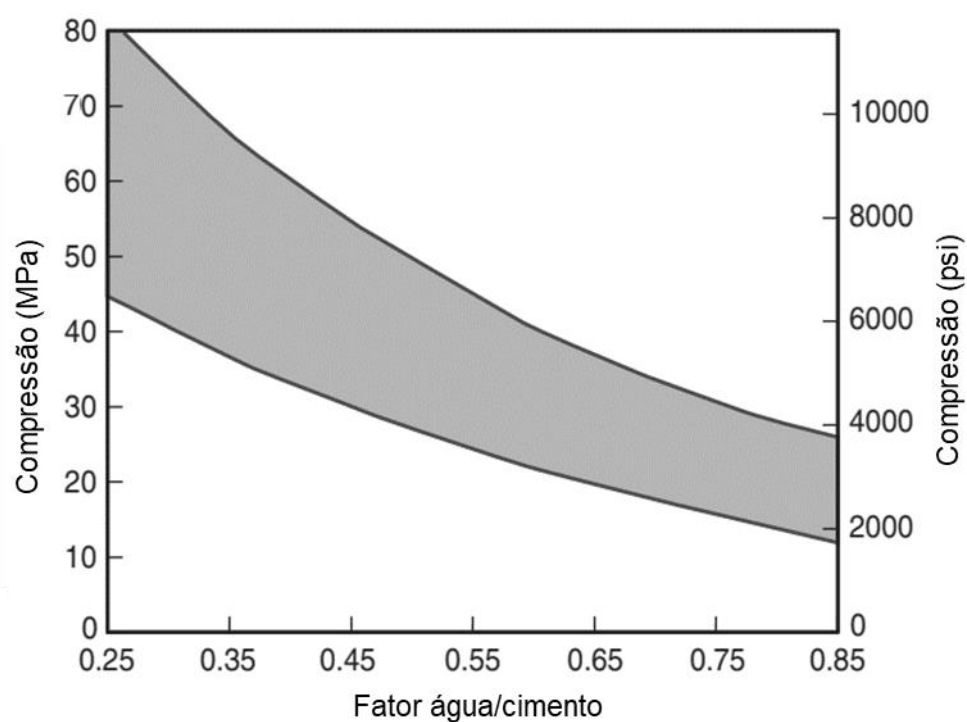


Figura 3 - Resultados experimentais relativos a relação entre o fator água-cimento e a resistência a compressão (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015)

Se observa na Figura 4 que o concreto com um menor fator água-cimento possui, quando aplicado carregamento, um comportamento mais próximo do elástico, diferenciando-se dos de maior fator que possuem comportamento elástico-plástico (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015; SINGH; MUNJAL; THAMMISHETTI, 2015).

É possível também relacionar a quantidade de água empregada na mistura para pastas de cimento e concreto com a variação de volume da mistura, um fator água-cimento menor aumenta o efeito da autodessecação, perda de água para o meio, e consequentemente da retração autógena (ACKER, 2004; BAROGHEL-BOUNY, 2007).

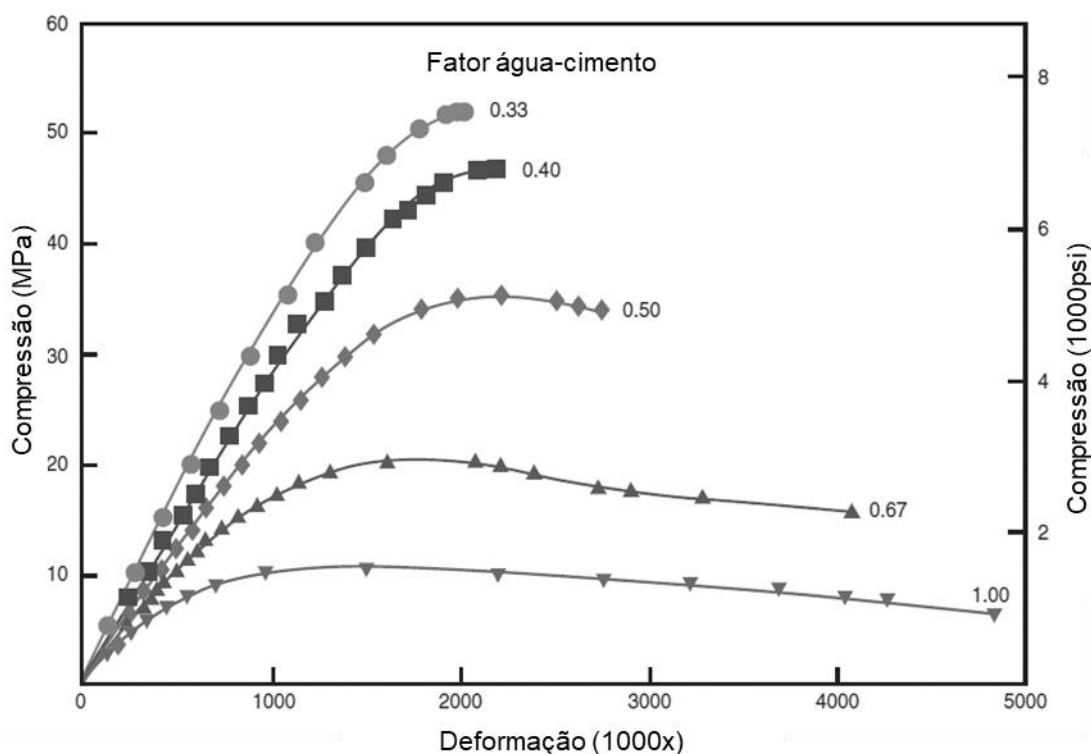


Figura 4 - Curva tensão deformação para o concreto com diferentes fatores água-cimento (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015)

A quantidade de água também influi diretamente na trabalhabilidade do concreto e na sua resistência, sendo diretamente proporcional ao primeiro e inversamente proporcional ao segundo. Cabe ao responsável pela dosagem atingir o equilíbrio entre essas características (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2015)

Outra característica do concreto endurecido que é influenciado pelo fator água cimento é a porosidade do mesmo. Como pode ser visto na Figura 5, o aumento desse fator, influencia diretamente no aumento do diâmetro dos poros. A quantidade de poros afeta diretamente a durabilidade do concreto, sendo importante o estudo dos efeitos do aumento da quantidade de água no concreto a longo prazo.

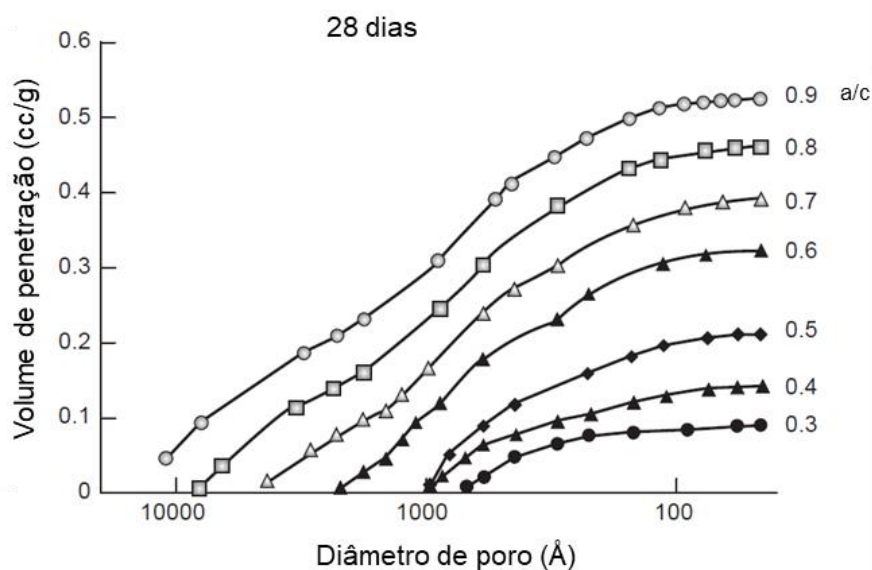


Figura 5 - Distribuição do tamanho dos poros em pastas de cimento hidratado
(MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Por último, a água pode ser encontrada de diversas formas no cimento endurecido, após a hidratação. Elas se relacionam diretamente com a própria estrutura do cimento já hidratado, podendo estar de forma livre, em poros ou adsorvida nos hidratos.

2.1.3 Aditivos

Os aditivos podem ser divididos em químicos e minerais, que se diferem nos seus objetivos e na sua forma de uso na pasta ou no concreto.

Os aditivos químicos são produtos tensoativos formados por moléculas orgânicas de cadeia longa, com uma extremidade hidrófila (que atrai a água) e outra hidrófoba (que repele a água). Os tensoativos são adsorvidos nas interfaces ar-água e cimento-água e a polaridade da molécula determina se a sua ação principal é de incorporação de ar ou de redução de água (HEWLETT, 2004).

Os objetivos dos aditivos químicos são principalmente os de melhorar a trabalhabilidade do concreto, acelerar ou reduzir o tempo de pega ou até mesmo reduzir a quantidade de água utilizada (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Em algumas situações o cimento é substituído parcialmente por aditivos de modo a modificar suas características, essas substituições são chamadas de aditivos

minerais. Vários podem ser esses aditivos, os mais comuns são: escória de alto forno, cinzas volantes, pó de pedra calcária, fumo de sílica (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

O objetivo dessa mistura é principalmente a redução de custos, devido ao custo superior da produção de cimento em relação aos aditivos. No entanto, a preocupação em relação a produção de gases causadores do efeito estufa durante a fabricação do cimento, tornou o uso de aditivos mais interessante, principalmente devido à baixa produção de CO₂ por eles (JUENGER; SIDDIQUE, 2015; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Os efeitos positivos dos aditivos minerais na pasta de cimento e/ou concreto também decorre do aumento da durabilidade e aumento da resistência a longo prazo, por outro lado as propriedades desses materiais desaceleram reação de hidratação diminuindo a resistência em baixas idades e contribui reduzindo o calor de hidratação (JUENGER; SIDDIQUE, 2015; LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

2.2 Transição de fases da pasta de cimento

Uma característica típica do processo de hidratação é a mudança de fase da pasta de cimento que, inicialmente, é uma suspensão de cimento em água, tornando-se, então, um sólido após a formação dos hidratos. Essa transição ocorre, segundo BENTUR (2002), quando se inicia a percolação da rede em três dimensões.

BENTUR (2002) também relaciona a transição de fases com dois fenômenos típicos da pasta de cimento, a retração química e a retração autógena. A retração química é a retração que ocorre pelo fato do volume dos reagentes ser maior que o volume dos produtos gerados na reação, já a autógena é a retração volumétrica da pasta de cimento ou concreto.

Desse modo, enquanto a pasta de cimento for um fluido, essas duas retrações são iguais, porém a partir do momento em que ocorre a formação de um esqueleto sólido, a retração química continua e a retração autógena tem sua taxa diminuída, como pode ser observado na Figura 6 . Assim, quando a taxa de retração autógena reduz drasticamente em relação a retração química, ocorre a transição de estado (BENTUR, 2002).

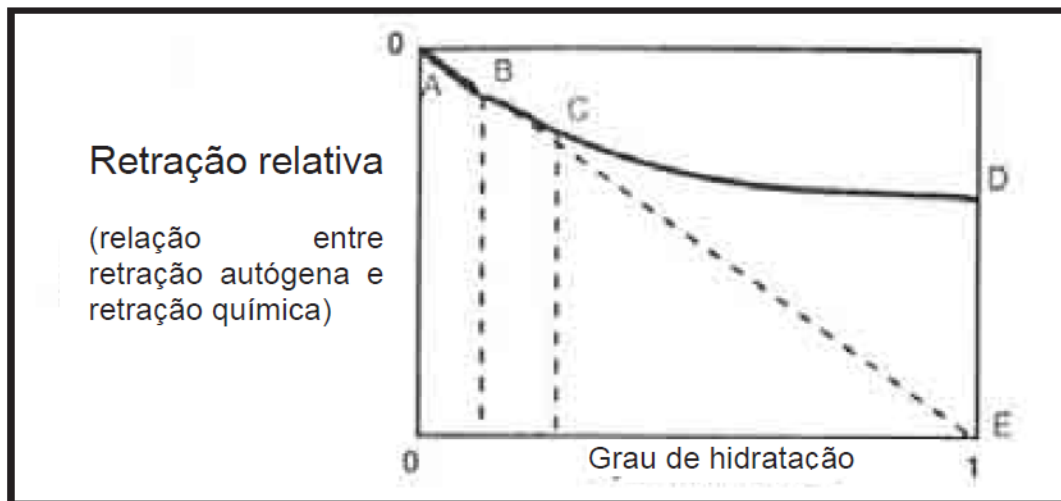


Figura 6 - Evolução esquemática da retração autóloga como função do grau de hidratação (SILVA 2007 adaptado de ACKER 1988)

Essa mudança é importante devido a sua relação com a trabalhabilidade da pasta e é relacionada ao enrijecimento, ou seja, a perda da consistência plástica da pasta. Esse fenômeno ocorre pela formação de hidratos como etringita e C-S-H e por evaporação de água. A formação dos hidratos com o passar do tempo pode ser visto na Figura 7, podendo ser relacionada com o enrijecimento da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

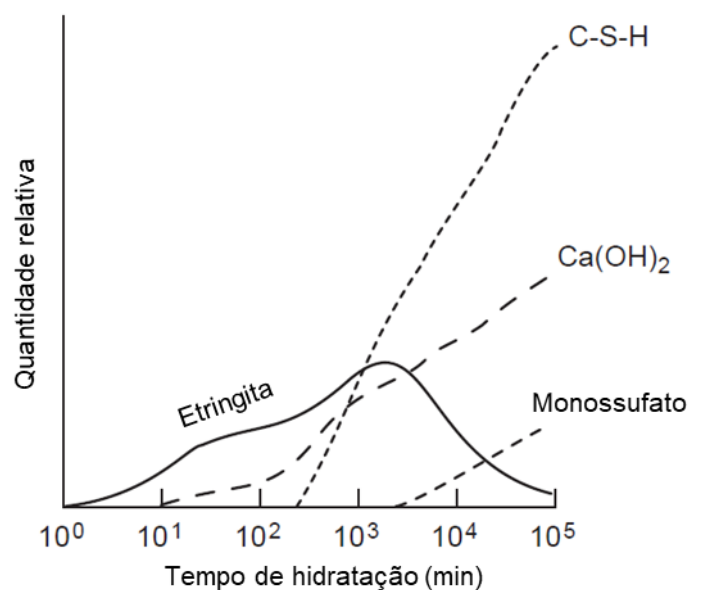


Figura 7 - Taxas típicas de formação de produtos de hidratação em um cimento portland comum (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

A pega, ou solidificação da pasta de cimento, tem seu início quando a pasta não é mais considerada trabalhável e seu fim quando a pasta já pode ser utilizada adequadamente para seu fim. O início e o fim de pega podem ser determinados a partir do experimento com a agulha de Vicat (MEHTA; MONTEIRO, 2006). O início da pega também pode ser determinado a partir de ondas ultrassônicas, considerado um modo bem preciso de determinação (TRTNIK et al., 2008).

O fim da pega não se relaciona com o final do processo de hidratação, esse continua a ocorrer junto gerando o endurecimento (aumento da resistência) da pasta de cimento. (NEVILLE, 1997). A evolução dessa característica pode ser observada a partir da Figura 8 que mostra a relação da resistência, ligada ao endurecimento, com o fim da pega, quando a mudança de fase já se completou.

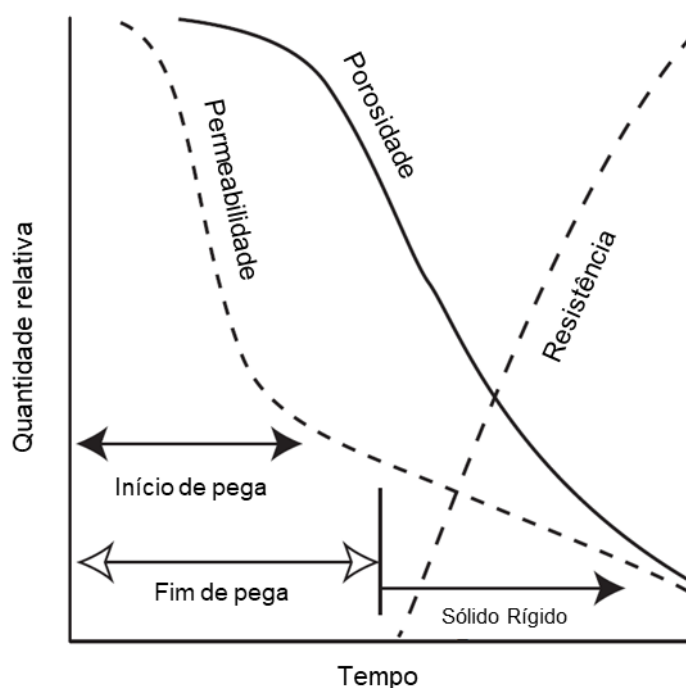


Figura 8 - Influência da formação de produtos de hidratação no tempo de endurecimento, porosidade, permeabilidade e resistência da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Segundo a teoria de ACKER (1988) sobre percolação da pasta de cimento, esse processo se inicia a partir do desenvolvimento de hidratos em torno dos grãos de cimento Portland. Esses hidratos aumentam e se conectam mecanicamente de forma aleatória,

formando as chamadas amas, ou seja, subconjuntos de grãos ligados mecanicamente. Por fim o aparecimento do primeiro caminho contínuo que atravessa o corpo inteiro constitui o limiar de percolação, considerado o início da pega, esses passos podem ser observados a partir da Figura 9.

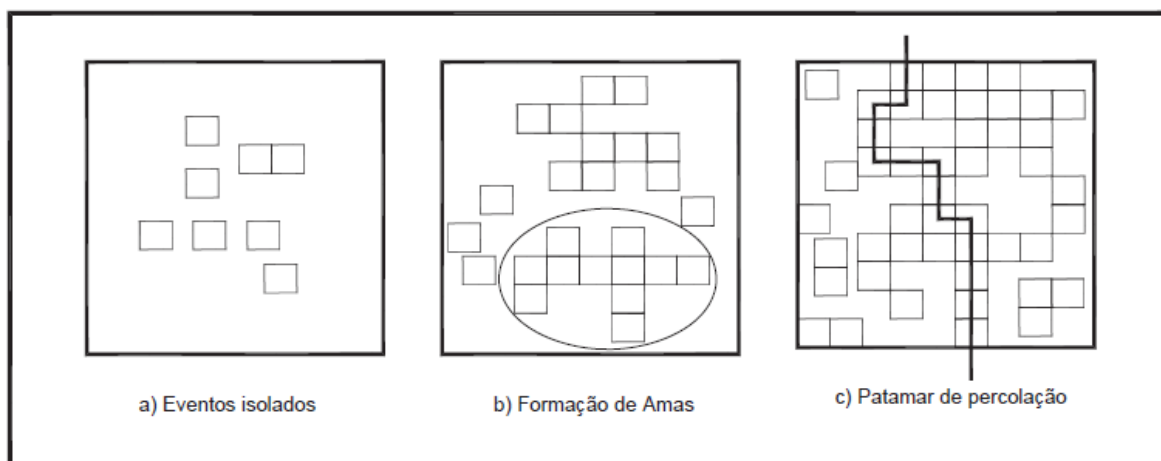


Figura 9 – Representação esquemática das noções da teoria de percolação segundo ACKER (SILVA, 2007)

Trazendo novamente a classificação do fenômeno por BENTUR (2002), considera-se que o patamar de percolação é alcançado no momento em que a retração autógena e a retração química passam a ser diferentes entre si. Isso pode ser observado também na Figura 6, no ponto B.

Desse modo enrijecimento e tempo pega são conceitos relacionados com a reação de hidratação e transição de estado da pasta de cimento. O início de pega ocorre devido ao enrijecimento do concreto causado pela formação de óxidos e perda de água, esse tempo marca o fim da trabalhabilidade e o começo da mudança de estado do cimento. O fim do tempo de pega marca o fim da transição de fase para sólida e o início do endurecimento do concreto, ou seja, ele começa a adquirir resistência.

2.2.1 Água na pasta de concreto endurecido

Com a mudança de estado da pasta de cimento, ocorrem também várias mudanças na estrutura química da mistura. A água que era apenas uma substância isolada

passa a ter funções na microestrutura do concreto. Como mostrado anteriormente, várias são as influências da água nas características físicas e de durabilidade do material. A compreensão desse fenômeno passa pelo entendimento de como a água está armazenada na pasta de cimento endurecida. A Figura 10 mostra a mudança volumétrica do arranjo da água e cimento ao longo da reação de hidratação.

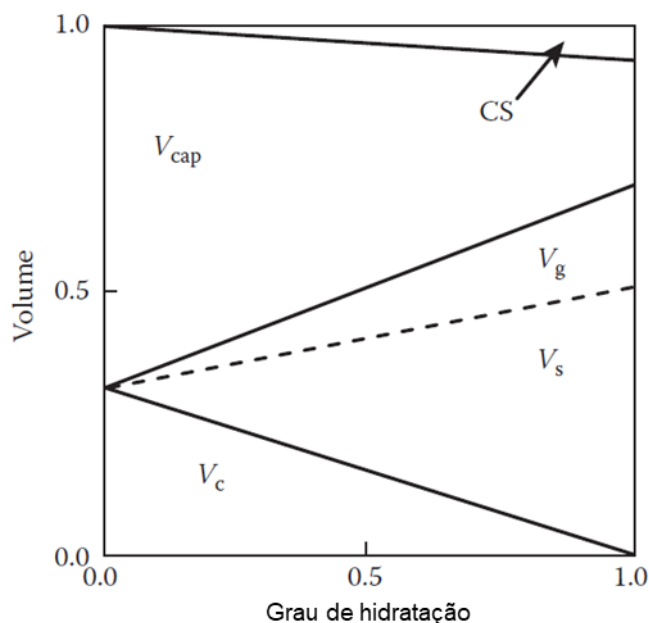


Figura 10 - Balanço volumétrico da reação de hidratação. CS: retração química. V_{cap}: água capilar. V_g: água gel. V_s: produtos sólidos da hidratação. V_c: cimento. (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Segundo BAROGHEL-BOUNY (1994) vários tipos de água coexistem numa mesma matriz e podem ser classificadas da seguinte maneira: livre; capilar; adsorvida; e quimicamente ligada. Assim, excetuando-se a água quimicamente ligada, os outros estados são uma função do tamanho dos vazios nos quais a água está localizada.

A água quimicamente ligada é aquela utilizada nas reações químicas de hidratação e está combinada com os hidratos formados nesse processo. Esse tipo se divide em água hidroxilada, faz parte da hidroxila (OH⁻) quimicamente ligadas ao Si e Ca, e a água molecular, água da cristalização (REGOURD, 1985 apud BAROGHEL-BOUNY, 1994).

A água adsorvida é aquela ligada aos sólidos através de forças intermoleculares que podem ser mais fracas ou físicas (força de van der Waals) ou mais forte ou química (ligações polares ou de ponte de hidrogênio). A distância entre a água e o sólido é inversamente proporcional a força entre eles, de modo que a água adsorvida se localiza principalmente na superfície dos sólidos existentes na pasta de cimento (REGOURD, 1985 apud BAROGHEL-BOUNY, 1994).

A visualização da água adsorvida da pasta de cimentos pode ser feitas a partir de dois modelos diferentes da molécula de C-S-H, o de FELDMAN e SEREDA (1968) e o de SIERRA (1974) apud BAROGHEL-BOUNY (1994), mostrados nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Nelas, é possível ver uma pequena diferenciação entre água externa e água inter-folhas, em que a segunda possui uma ligação muito mais forte e difícil de ser quebrada (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

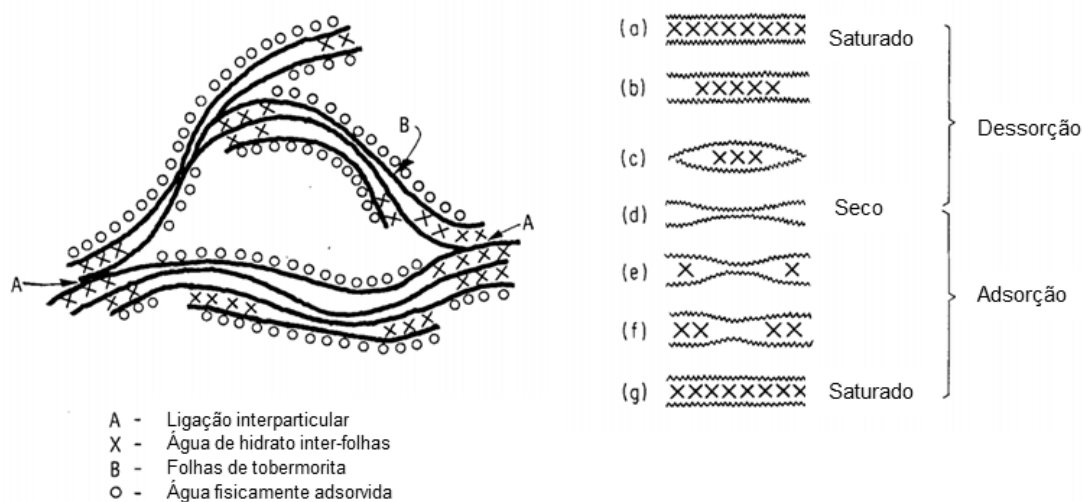


Figura 11 - Modelo de FELDMAN e SEREDA (1968)

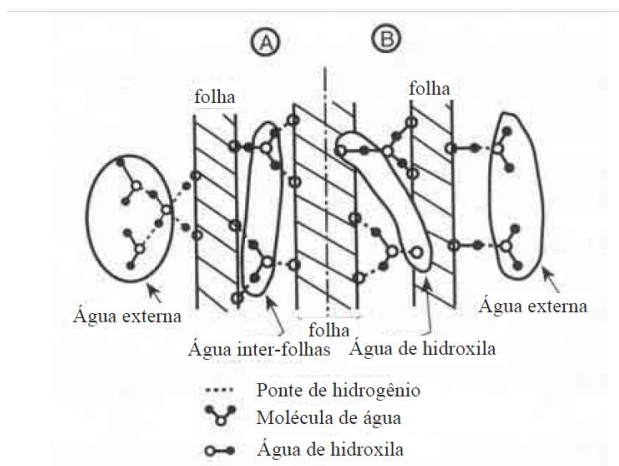


Figura 12 – Modelo adaptado de SIERRA (1974) apud BAROGHEL-BOUNY (1994)

A água capilar preenche os poros ao redor das camadas de água adsorvida e está separada da fase pelos meniscos. Ela é formada a partir da condensação capilar da água e pode ter efeitos importantes sobre a pasta de cimento, dependendo do seu grau de ligação com o sólido, seu movimento pode gerar retração ou expansão da massa (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

Por último, a água livre é um tipo de água que não está sob influência de forças intermoleculares ou superficiais, se encontra em poros grandes e está em equilíbrio com a fase gasosa por intermédio de uma interface plana (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

2.2.2 Poros

Como mostrado anteriormente na Figura 6, durante a reação entre a água e o concreto ocorre uma redução do volume da massa, isso ocorre porque o volume dos reagentes combinados é inferior ao volume dos produtos. Considera-se que para um cimento totalmente hidratado e sem água residual, a redução de volume pós reação é cerca de 18,5% (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Entretanto, na prática, essa redução não ocorre por completo. A partir da formação do esqueleto sólido da pasta de cimento, ela não pode mais se retrair completamente, desse modo são formados os poros capilares no interior do corpo (NEVILLE; BROOKS, 2010). As relações volumétricas entre reagentes e produtos da hidratação podem ser observadas na Figura 13.

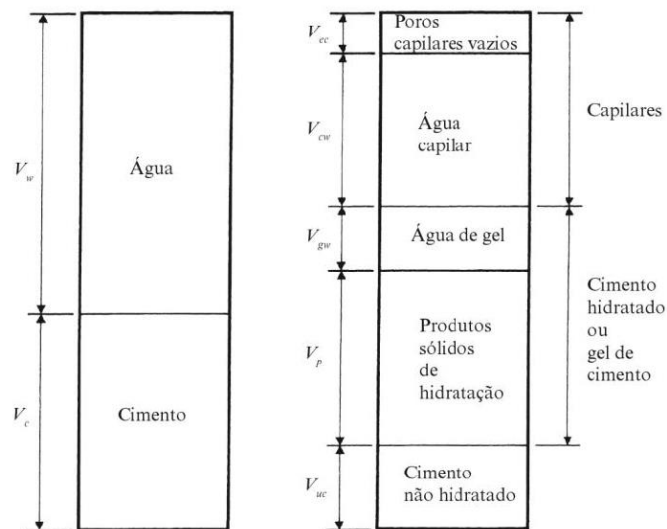


Figura 13 - Relação volumétrica entre produtos e reagentes da hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2010)

No decorrer da reação de hidratação, os poros capilares têm seu volume reduzido. A utilização da água que os preenchem para a hidratação do cimento faz com que eles se fechem pelas forças de capilaridade, gerando assim retração autógena no concreto. Esse fenômeno já foi mostrado anteriormente na Figura 8 e pode ser observado novamente na Figura 14.

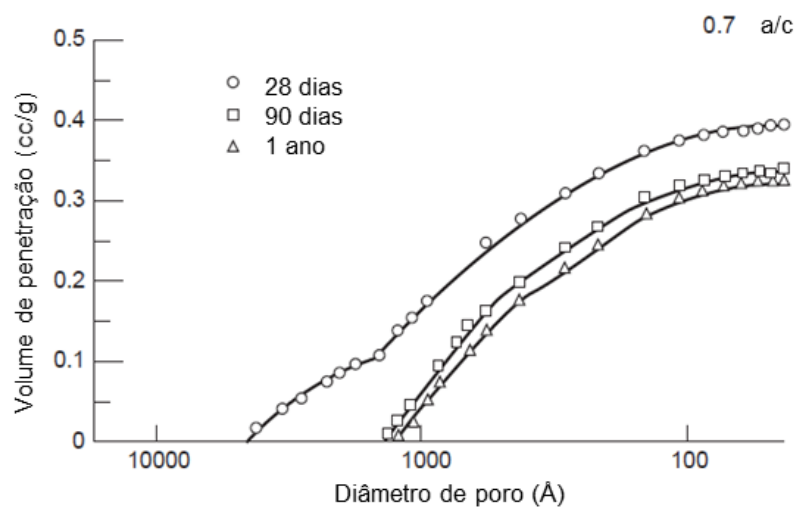


Figura 14 - Variação da porosidade com o tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Outro tipo de porosidade existente no concreto é a porosidade formada entre as camadas de C-S-H. Os modelos de FELDMAN e SEREDA (1968) e de SIERRA (1974), nas figuras 11 e 12, respectivamente, mostram esse tipo de poro, onde parte da água adsorvida pelo hidrato está armazenada devido a ligações de hidrogênio. O tamanho reduzido desses poros, no entrando, não afetam características como resistência e permeabilidade da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Por último, existem os poros de ar, formados normalmente durante a mistura entre a água e cimento, eles são apenas uma pequena quantidade de ar dentro da pasta de cimento. Alguns aditivos químicos, tem como objetivo inserir esses poros com o para melhorar a trabalhabilidade, porém sendo muito maiores que os poros capilares, eles podem interferir diretamente na resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

2.3 Reações de Hidratação

A reação de hidratação ocorre entre a água e os componentes do cimento. No estudo dessa reação três são os aspectos mais importantes que devem ser conhecidos e estudados: a forma da reação, mudanças na energia e sua velocidade (BENAMEUR; COPELAND, 1964).

O conhecimento da reação nesses aspectos permite o conhecimento da pasta de cimento ou do concreto em todas suas etapas (estado de suspensão, transição de fase e estado sólido). A partir deles sabe-se sobre as propriedades cimentíceas, calor liberado e quando se iniciará a pega, enrijecimento e endurecimento da mistura (BENAMEUR; COPELAND, 1964).

A Figura 15 permite a visualização das mudanças que ocorrer durante a reação de hidratação, desde retração química e redução do volume e quantidade de poros até a formação dos hidratos. É possível notar que mesmo com o avanço dos anos parte dos reagentes não são consumidos na reação.

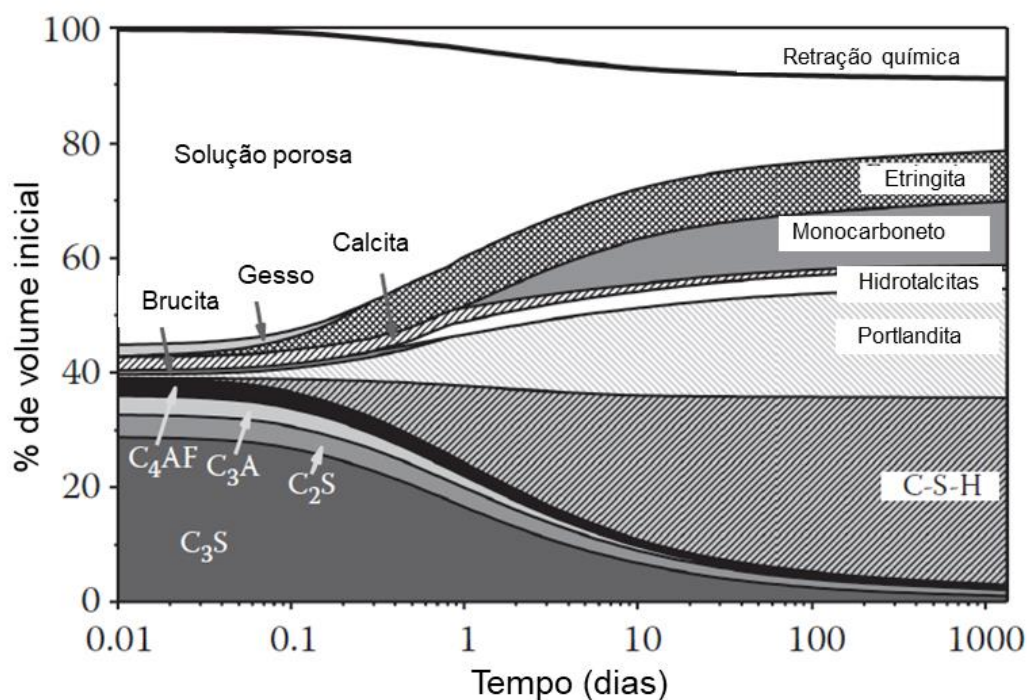


Figura 15 - Evolução da reação de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

2.3.1 Mecanismo de hidratação

Sendo o cimento a mistura de diversos compostos químicos minerais, o mecanismo de hidratação se refere ao estudo de cada uma das reações entre a água e esses compostos que reagem simultaneamente, podendo se influenciar mutuamente. É importante lembrar que cada reação química ocorre em taxas diferentes e isso influi diretamente nesse mecanismo (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo SCRIVINER e NONAT (2011), a hidratação se baseia em um processo de dissolução e precipitação, e produtos da reação tenham uma solubilidade inferior aos reagentes. Os autores também afirmam que durante o processo sempre haverá pelo menos duas fases sólidas (reagente e produto), além da fase líquida, considerado então um processo heterogêneo.

Em um primeiro momento não existe um equilíbrio entre dissolução e precipitação entre reagente (anidro) e produto (hidrato), pois a reação química ainda não foi iniciada, de modo que no início ocorre unicamente a dissolução dos anidros para que então a partir da reação comece a ser formada a parte menos solúvel, o hidrato (SCRIVINER; NONAT, 2011).

Para um estudo mais coerente e simplificado desse mecanismo, se analisa separadamente os silicatos dos aluminatos (C_3A) e os ferroaluminatos (C_4AF), pois o C_4AF ao reagir com sulfato e água formam estruturas semelhantes aos dos aluminatos hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Os hidratos produzidos na reação da água com o C_3A são produzidos em alta velocidade gerando uma grande quantidade de calor, tornando inviável sua utilização puro, para evitar esse superaquecimento é importante a adição de cal que irá reduzir a velocidade de reação (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Em um primeiro momento a mistura de cimento e água é uma solução com diversos íons de hidróxido, álcali, sulfato e cálcio dissolvido na água. A alta taxa de sulfato/aluminato faz com que pequenas agulhas prismáticas com o nome de etringita sejam os primeiros hidratos a serem cristalizados a partir de uma solução saturada de cálcio e hidróxidos. A etringita contribui para o começo do enrijecimento e da pega do concreto. Com o esgotamento do sulfato na solução e o aumento da concentração de alumínio a etringita se torna instável e gradualmente se converte em monosulfato (SCRIVENER, NONAT, 2011).

A quantidade de gesso a ser adicionada no cimento depende diretamente de testes que visam avaliar a quantidade ótima, levando em conta a menor retração e maior resistência que ele pode fornecer. Além de reduzir a velocidade de reação da água com o aluminato, o gesso também funciona como acelerador de hidratação da alita, acelerando também o endurecimento da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Esse efeito pode ser observado a partir da Figura 16.

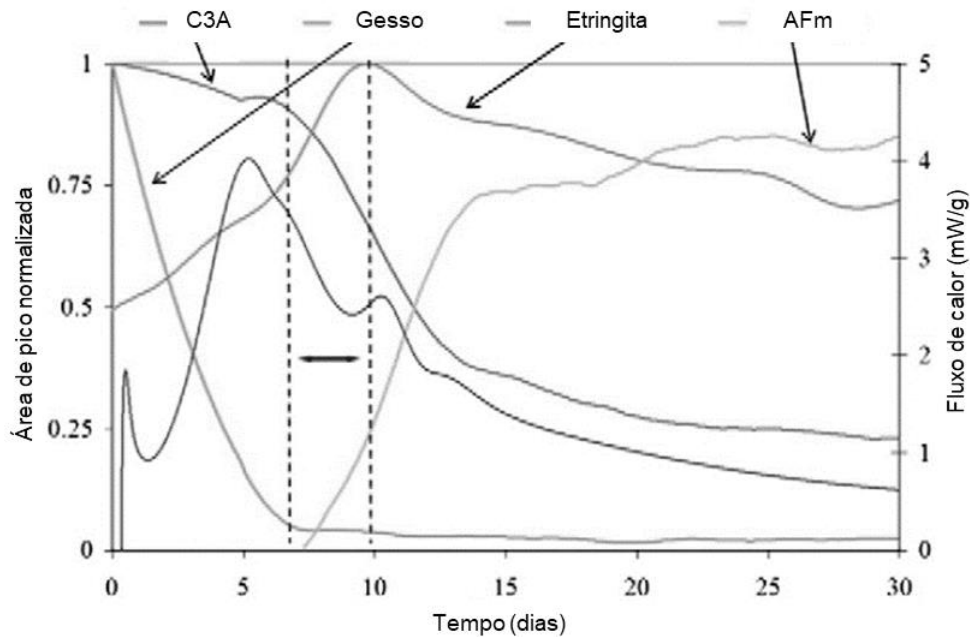


Figura 16 - Evolução da montagem de fases para um sistema de clínquer de laboratório (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015)

Já a alita e belita produzem silicatos de cálcio (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH) que possuem estruturas cristalinas e uma relação cálcio/sílica diferente uma da outra. Apesar dessas diferenças, como essa relação pode variar dependendo de aspectos como temperatura, razão água-cimento e tempo de hidratação, todos são simplificados chamados de C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 2006). A razão estequiométrica da hidratação desses compostos pode ser vista nas equações abaixo:



A alita possui uma reação mais rápida e responsável por parte importante do início de pega e da resistência do concreto nas primeiras idades. Apesar disso, um cimento com grande quantidade de belita, devido a estequiometria, produz uma pasta mais resistente e mais durável em idades mais avançadas, além de requerer uma menor quantidade de água para hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

2.3.2 Liberação de calor e velocidade da reação

Na reação de hidratação, substâncias instáveis transformam-se em outras mais estáveis que as primeiras, liberando assim quantidade significativa de calor, desse modo essa reação é chamada de exotérmica. Além disso, ela ainda tem sua cinética acelerada devido ao aumento da temperatura, sendo classificada também de reação termo-ativada (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Do mesmo modo que cada componente do cimento tem um mecanismo de hidratação diferente, a liberação de calor da hidratação também depende de cada uma das substâncias. A evolução do calor liberado na reação de hidratação de uma pasta de cimento pode ser dividida em cinco estágios, como observado na Figura 17.

Na análise de liberação de calor da pasta de cimento ou concreto os principais componentes do cimento serem analisados são a C_3S e os aluminatos, já que a liberação da belita ocorre de maneira significativa apenas a partir dos 10 dias de mistura do cimento com a água (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015).

BULLARD et al., (2011) consideram as principais etapas do processo podem ser mostradas a partir da liberação e são: reação inicial, período de baixa reação, período de aceleração e período de desaceleração.

A primeira etapa se refere às reações iniciais, na qual ocorre a dissolução do cimento, principalmente do C_3S , com alta liberação de calor e formação da etringita, formando assim o primeiro pico exotérmico da reação de hidratação (SCRIVENER, et al., 2015; SCRIVENER, NOMAT, 2011; BULLARD, et al., 2011).

A segunda etapa é o período de dormência, em que as reações ocorrem em um ritmo menos acelerado de modo que a liberação de calor é baixa, apesar disso ocorre grande concentração de alguns íons, principalmente de cálcio (SCRIVENER, et al., 2015; SCRIVENER, NOMAT, 2011; BULLARD, et al., 2011).

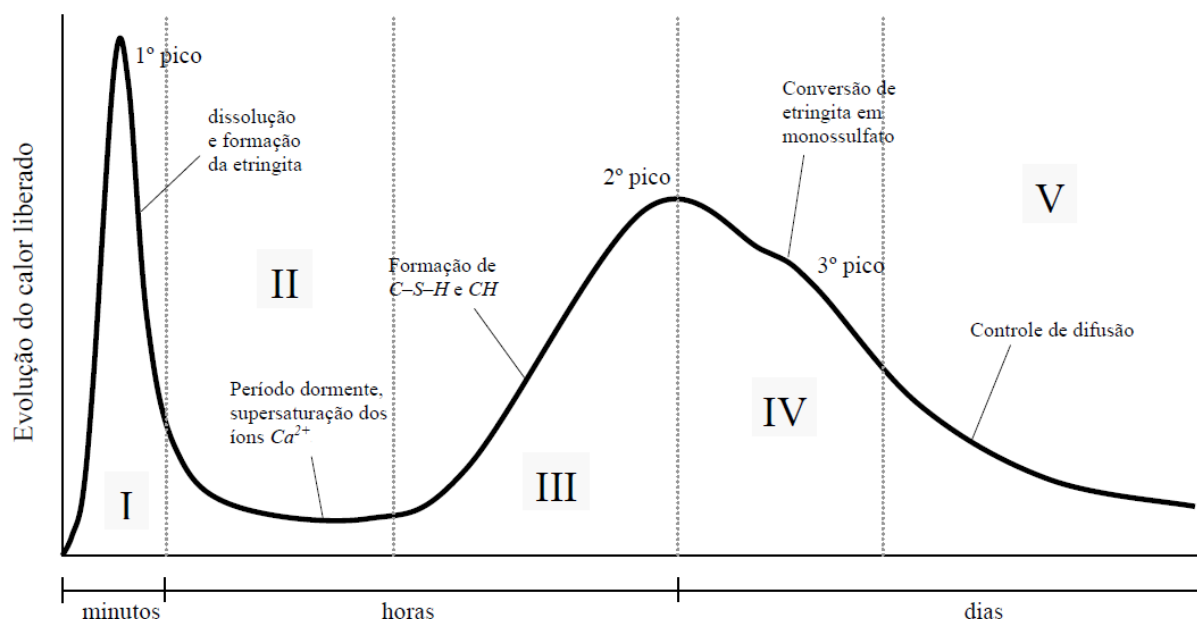


Figura 17 - Estágios do processo de hidratação (FARIA, 2004)

O segundo pico exotérmico ocorre na terceira etapa em que a alta concentração induz a formação de C-S-H e CH e consequentemente a liberação de calor, essa etapa é chamada de aceleração. Acredita-se que a mudança de dormência para o período de aceleração ocorra devido à grande concentração de hidróxido de cálcio (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015).

Logo após ocorre o período de desaceleração, ou quarta etapa, em que a cinética da reação é reduzida, mesmo assim ainda ocorre a formação de etringita a partir dos íons dissolvidos. Sendo os principais motivos para isso o consumo das partículas menores, restando apenas as maiores, a falta de espaço e a falta de água (BULLARD et al., 2011).

A última etapa é a hidratação desacelerada que continua a ocorrer após todos os processos citados acima, porém em um ritmo mais lento, principalmente devido a difusão controlada da água para a hidratação dos grãos de cimento (BULLARD et al., 2011).

2.4 Grau de Hidratação

O grau de hidratação está relacionado à quantidade de cimento Portland já hidratada da mistura e serve para averiguar a evolução da reação química. Sua importância se refere à relação desse aspecto com evolução do módulo de elasticidade e com a resistência da pasta de cimento (BOUMIZ; VERNET; TENIUDJIT, 1996).

O grau de hidratação segundo BENTUR (2002) é a relação entre o cimento já hidratado e o cimento total inicial. Ele varia entre 0 e 1 e é representado pela letra grega ξ , e pode ser calculado de diversas formas. Utilizando-se o próprio conceito do grau de hidratação, tem-se:

$$\xi = \frac{\text{Cimento hidratado}}{\text{Cimento total}} \quad \text{Equação 11}$$

O grau de hidratação ξ pode ser calculado de outras formas, devido à dificuldade de se medir a quantidade de cimento total hidratado de um concreto ou de uma pasta de cimento. Utilizando as características da reação de hidratação, é possível encontrar meios mais simples de alcançar o valor.

Uma forma utilizada de cálculo é através da quantidade de calor liberado. Sabe-se que a hidratação é uma reação exotérmica, de modo que a quantidade de calor liberado se relaciona diretamente com a própria reação de hidratação. Desse modo, considera-se um tempo de hidratação completa do material, em um tempo dito infinito, e a partir dele calculam-se os outros:

$$\xi(t) = \frac{Q(t)}{Q(t=\infty)} \quad \text{Equação 12}$$

Se considerado um sistema isolado, em que não há trocas de matéria ou calor com o ambiente, o cálculo da hidratação pode ser feito a partir da própria temperatura do concreto, tendo resultados provenientes da mesma mistura anteriormente. Um concreto hidratado em um calorímetro adiabático estaria nessas condições, de modo que o grau de hidratação corresponde a razão entre a temperatura do corpo de prova em determinado momento e a temperatura final dele.

$$\xi(t) = \frac{T(t)}{T(t=\infty)} \quad \text{Equação 13}$$

Análises mais diretas da pasta de cimento podem ser feitas com o objetivo de calcular o grau de hidratação, a difração de raios x permite observar a quantidade de cimento que ainda não reagiu na pasta (SCRIVENER et al., 2004). Já a análise termogravimétrica permite observar a quantidade de água ligadas a óxidos e consequentemente avaliar o grau de hidratação. Os resultados desses dois métodos podem ser observados nas equações 14 e 15 (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHEBACH, 2016).

$$\xi(t) = 1 - \frac{\text{Cimento não hidratado}}{\text{Cimento total}} \quad \text{Equação 14}$$

$$\xi(t) = \frac{W(t)}{W(t=\infty)} \quad \text{Equação 15}$$

Essas diversas formas de cálculo de grau de hidratação permitem monitorar de diversas formas a evolução da hidratação do cimento. Entretanto, deve-se levar em conta que a resistência a compressão calculada pelo concreto deve ser atingida antes da hidratação ser completa, isso porque aos 28 dias se considera o concreto como tendo atingido sua total resistência, sabe-se, no entanto, que a hidratação continuar por anos, aumentando continuamente, mesmo que pouco, a resistência a compressão.

Desse modo, uma nova terminologia pode ser utilizada para essa situação em que o concreto não tem sua hidratação completa, chamada de grau de desenvolvimento de calor. Ela pode ser utilizada quando a hidratação não for completa, assim os parâmetros utilizados como referência não serão o do fim de hidratação, mas o fim do experimento (LACARRIÈRE L. et al. 2019).

2.5 Modelo de hidratação de ULM e COUSSY (1995)

Utilizando os conhecimentos adquiridos sobre a reação de hidratação do cimento, ULM e COUSSY (1995) desenvolveram um modelo termo-químico-mecânico utilizado de forma numérica para prever a evolução desse fenômeno em pastas de cimento e concretos em baixa idade. O modelo baseia-se principalmente na cinética da reação, utilizando como base a exotermia e auto-ativação da reação (FAIRBAINR, 2011).

A importância dessa evolução está na relação entre o grau de hidratação do cimento e avanço de características como resistência, módulo de elasticidade e retração autógena. O aumento do módulo de elasticidade (observado na Figura 18), resulta no aumento das tensões causadas pela retração autógena e térmica, acima da magnitude da resistência, podendo causar microfissuras que afetarão a durabilidade (ULM; COUSSY, 1996).

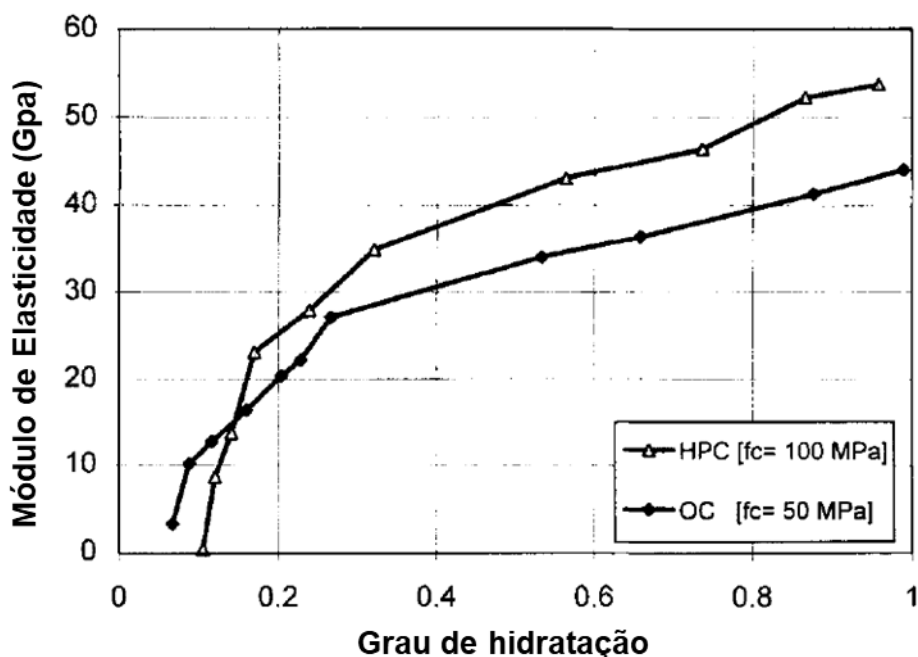


Figura 18 - Evolução do modo de elasticidade em função do grau de hidratação. HPC: concreto de alta performance. OC: concreto comum. (ULM; COUSSY, 1996)

2.5.1 Evolução do campo de temperatura e hidratação

O modelo de ULM e COUSSY (1995) parte do princípio que o concreto é inicialmente um fluido constituído de cimento, água, areia e brita, e que a partir das reações de hidratação ele passa a ser um sólido formado por um conjunto de hidratos que formam uma rede de poros por onde passa ar e/ou água.

Como essa reação é contínua, o concreto pode ser considerado um meio poroso quimicamente reativo, a água existente em um poro, ao encontrar um anidro, reage para formar um hidrato. Desse modo, ULM e COUSSY (1995) deduziram equações

constitutivas baseando-se na termodinâmica dos meios porosos e nas características térmicas, químicas e mecânicas do concreto.

A equação básica dessa teoria é a equação de evolução dos campos térmicos observada abaixo:

$$C_{\varepsilon} \dot{T} = Q + L_m \dot{m} + k \nabla^2 T \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

C_{ε} - calor específico à deformação constante para o concreto;

Q - fluxo de calor originário de alguma fonte de calor;

k - condutividade térmica;

T – temperatura;

L_m - calor latente de hidratação;

$\dot{m}$ - velocidade da reação representada pela velocidade com que a massa de esqueleto aumenta.

Considerando que o ‘ m ’ se refere à massa do esqueleto de hidratos formados pela reação da água com o cimento, sabe-se que essa grandeza se relaciona diretamente com o próprio grau de hidratação, podendo-se então considerar a equação como mostrado abaixo, para isso a constante L_m deverá ser multiplicada pela massa total do esqueleto após a hidratação formando uma nova constante L (FAIRBAINR, 2011).

$$C_{\varepsilon} \dot{T} = Q + L \dot{\xi} + k \nabla^2 T \quad \text{Equação 17}$$

2.5.2 Cinética da hidratação

A velocidade de hidratação da pasta de cimento depende diretamente do próprio grau de hidratação do mesmo já que, como dito anteriormente, se trata de uma reação termo-ativada.

Uma forma de avaliar a cinética da reação é a partir do ensaio de elevação adiabática da temperatura, as características da reação fazem com que a cinética dependa diretamente da temperatura inicial, como pode se observar na Figura 19.

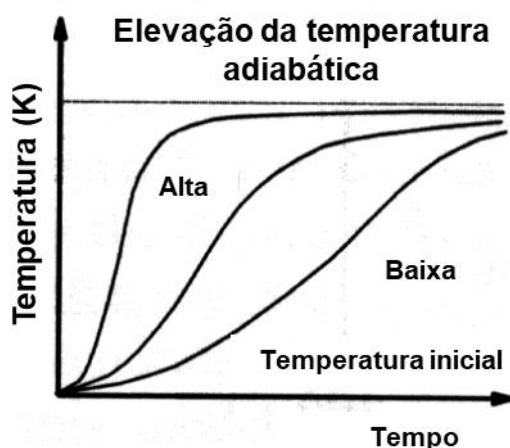


Figura 19 - Elevação adiabática com diversas temperaturas iniciais (FAIRBAIRN, 2001)

Além disso, a forma como a hidratação ocorre, a camada de hidrato formada ao redor do grão de cimento dificulta, progressivamente, a ocorrência da reação, influenciando assim na cinética, como observado na Figura 20.

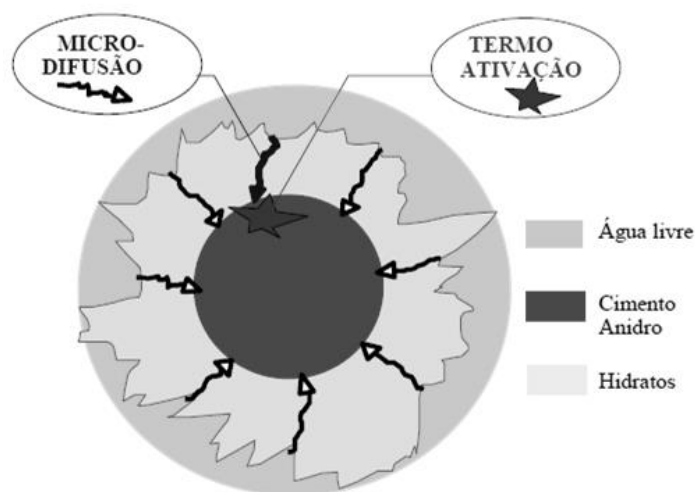


Figura 20 - Evolução da reação de hidratação (adaptado de ULM; COUSSY, 1995)

A partir dessas características da reação de hidratação, e utilizando-se a lei de Arrhenius, os pesquisadores Ulm e Coussy desenvolveram sua teoria chegando à equação da cinética de hidratação do cimento.

$$\frac{d\xi}{dt} = \tilde{A}(t)e^{\left(\frac{-Ea}{RT^{ad}(t)}\right)} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

$\tilde{A}(t)$ - Afinidade normalizada;

Ea - Energia de ativação;

R - Constante universal dos gases;

$T^{ad}(t)$ - Temperatura adiabática no tempo t .

Sendo a afinidade química um parâmetro relacionado a propensão de reação entre os agentes químicos, a afinidade normalizada, além de englobar a química, também abrange os efeitos físicos relacionados ao aumento da massa de hidratos (difusão, viscosidade) (FAIRBAINR, 2001).

2.5.3 Determinação da cinética de hidratação a partir da elevação adiabática de temperatura

Em condições adiabáticas, tem-se na Equação 19 o valor de Q e de $k\nabla^2 T$ zerados devido à inexistência de troca de calor e da variação espacial de temperatura, respectivamente. Desse modo, uma reação de hidratação em condições adiabáticas tem sua equação de evolução dos campos térmicos resumida abaixo:

$$C_\varepsilon \dot{T}^{ad} = L\dot{\xi} \quad \text{Equação 19}$$

A partir dessa equação simplificada e de algumas deduções feitas por Ulm e Coussy, considerando a temperatura inicial de elevação adiabática, e que no começo não

há hidratação e em um tempo infinito ela estará completa, é possível chegar a algumas equações para a compreensão da cinética.

A primeira permite que seja conhecido o valor de L a partir dos resultados obtidos na elevação adiabática, considerando T_{∞}^{ad} um valor assintótico.

$$\frac{C_{\varepsilon}}{L} = T_{\infty}^{ad} - T_0^{ad} \quad \text{Equação 20}$$

Também é possível a partir apenas do ensaio adiabático definir o grau de hidratação a partir das temperaturas adiabáticas obtidas.

$$\xi(t) = \frac{T^{ad}(t) - T_0^{ad}}{T_{\infty}^{ad} - T_0^{ad}} \quad \text{Equação 21}$$

Um exemplo de curva de hidratação em função do tempo obtida a partir de uma elevação adiabática é dado por Ulm e Coussy (1996) na Figura 21.

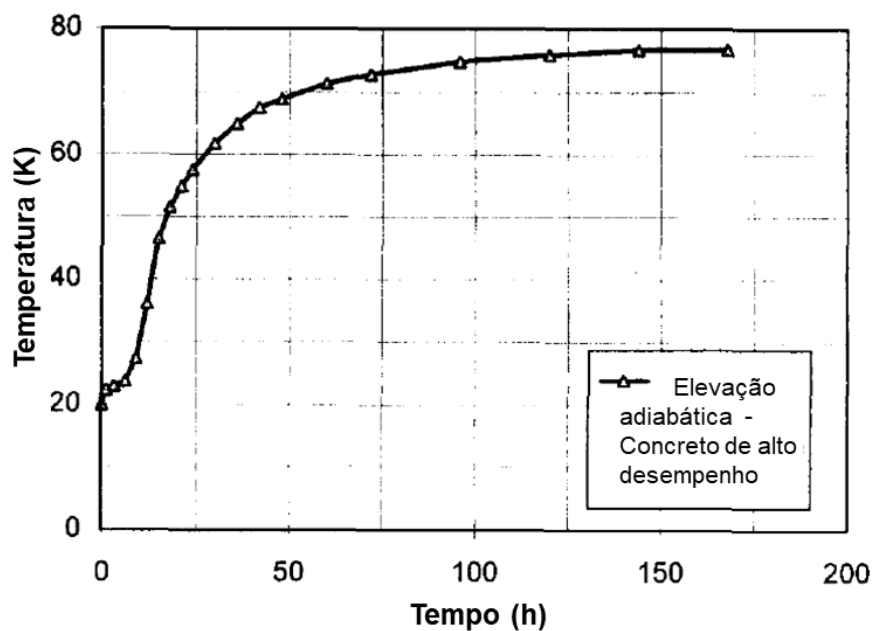


Figura 21 - Elevação adiabática de temperatura em função do tempo (ULM e COUSSY, 1996)

Por último, a afinidade normalizada pode ser obtida a partir do tempo, utilizando-se as Equações 18 e 19, de modo que ela deixa de ser uma função da hidratação do concreto.

$$\tilde{A}(t) = \frac{c_{\varepsilon}}{L} \frac{dT^{ad}(t)}{dt} e^{\left(\frac{Ea}{RT^{ad}(t)}\right)} \quad \text{Equação 22}$$

Ulm e Coussy fornecem um exemplo de gráfico, dessa vez da afinidade normalizada em função do grau de hidratação. Apesar de na Equação 22 esse dado ser fornecido em função do tempo, a hidratação obtida na Equação 21 também é calcula em função do tempo, sendo possível fazer uma relação mais precisa, já que a afinidade em si depende do grau de hidratação do concreto, como pode ser visto na Figura 22.

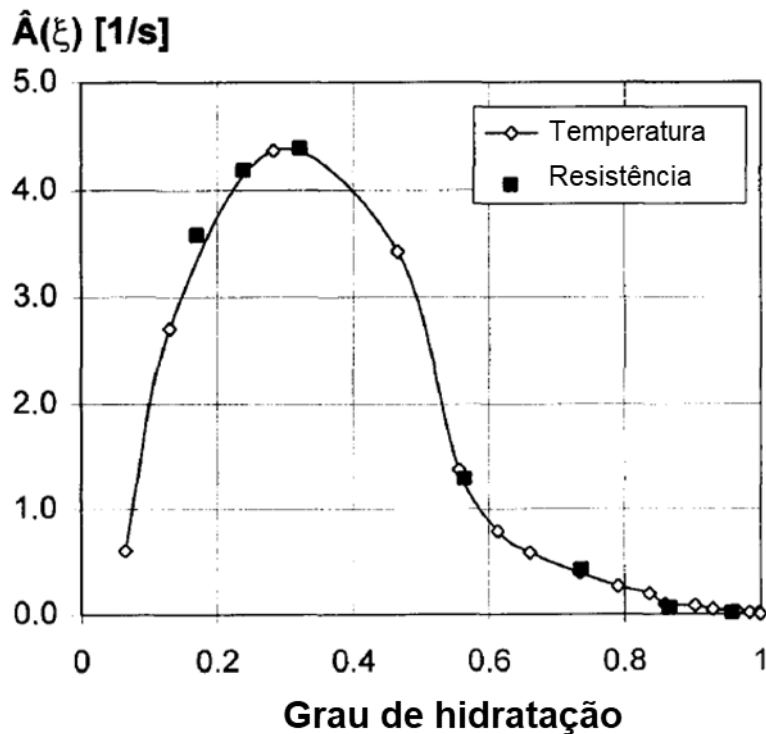


Figura 22 - Afinidade normalizada em função da hidratação (ULM e COUSSY, 1996)

2.6 Heterogeneidade do concreto

A heterogeneidade do concreto é um tema instigante e que tem gerado diversas pesquisas por diferentes grupos ao redor do mundo, sendo os principais considerados o do Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées (LCPC), em Paris, e da Universidade de Delft, na Holanda. Ambos criaram modelos computacionais baseados em dados experimentais considerando o que influencia na heterogeneidade do concreto e também as consequências dessa propriedade suas características.

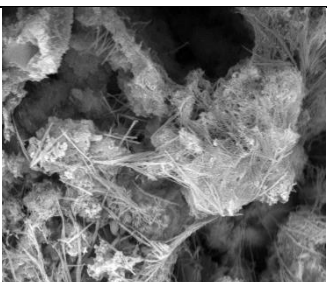
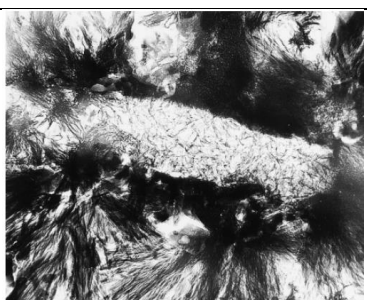
Apesar do constante cuidado para trazer a máxima homogeneidade para o concreto, seja na granulometria ou na forma que ele deve ser misturado para uso, a heterogeneidade ainda é uma característica marcante desse material. Os diferentes tamanhos de agregados, existência de poros após a hidratação, e os fenômenos da secagem e retração contribuem para a existência dessa propriedade (ROSSI; RICHER, 1987).

Entretanto, é possível observar variações desse fenômeno de acordo com a escala do concreto observado. Diferentes escalas podem apresentar heterogeneidades diferentes e até mesmo nenhuma heterogeneidade. As escalas mostradas a seguir são uma adaptação do proposto por CONSTANTINIDES e ULM (2004) e SILVA (2007) e mostram a variação da heterogeneidade.

- Escala IV: macroscópica (superior a 10^{-1} m), escala observada em elementos estruturais com armadura. Material ainda mostra-se homogêneo.
- Escala III: mesoescala (10^{-2} a 10^{-1} m), escala observada em corpos de prova. É possível observar os agregados graúdos na argamassa de cimento, nessa escala a heterogeneidade ocorre através desses agregados de diferentes tamanhos e distribuições.
- Escala II: microscópica (10^{-6} a 10^{-4} m), escala de observação da pasta de cimento. A pasta de cimento também se mostra heterogênea através dos tamanhos e dispersão dos poros, grãos de clínquer, água, aluminato, hidróxido de cálcio e C-S-H.
- Escala I: nanoscópica (10^{-8} a 10^{-6} m), escala observada a partir de potentes microscópios, incluindo microscópio atômico. A heterogeneidade dessa escala é observada a partir dos C-S-H de diferentes densidades e também apresentam valores de módulo de elasticidade diferentes entre si. A diferença na densidade

dos hidratos ocorre principalmente devido a distância do o grão de cimento hidratado (TENNIS; JENNINGS, 2000).

Tabela 3 - Microestrutura multiescala de materiais à base de cimento

Escala	Imagem	Elementos
IV		Concreto homogêneo
III		Pasta homogênea e agregados graúdos
II		C-S-H homogêneo, grãos de cimento, CH, aluminatos e poros
I		2 tipos de C-S-H

Fonte: adaptado de CONSTANTINIDES e ULM (2004) e SILVA (2007) micrografia da escala I de RICHARDSON (1999)

Essas formas de heterogeneidade, para a modelagem computacional, devem ser repetidas de forma representativa de modo que a simulação seja adequada realidade. Um exemplo disso pode ser observado na Figura 23, na qual é mostrado o modelo da Universidade de Delft da estrutura de grãos gerados aleatoriamente, que representa a heterogeneidade do concreto devido a distribuição dos seus agregados, ou seja, na escala III.

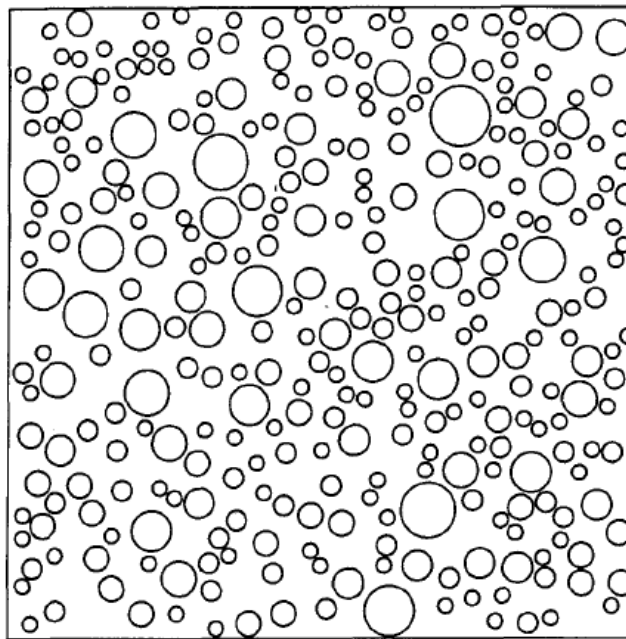


Figura 23 - Estrutura de grão gerada pelo modelo (SCHLANGEN; VAN MIER, 1992).

A heterogeneidade tem efeitos diretos nas propriedades físicas do concreto, principalmente no que se refere ao mecanismo de fratura. Ela gera de forma aleatória pontos mais fracos e pontos mais fortes no material de modo que, quando submetido a esforços, aparecerão microfissuras, primeiramente nesses pontos de menor resistência, posteriormente elas irão aumentar formando fissuras maior até a fratura do corpo (ROSSI et al., 1994; ROSSI; RICHER, 1987; SCHLANGEN; VAN MIER, 1992).

Uma forma de simular computacionalmente esse processo do rompimento de um corpo de prova de concreto consiste em dividi-lo em faixas axiais e atribuir de forma aleatória seguindo uma distribuição estatística normal. SCHLANGEN e VAN MIER (1992) utilizaram em sua simulação a distribuição normal, com valores fixados de média e desvio padrão, como pode ser observada na Figura 24.

Rossi e Richer (1987) também mencionam a chamada curva de Weibull de distribuição estatística como outra possibilidade de utilização para o fim de simulação computacional, sendo mais precisa pela impossibilidade de valores negativos. WEIBULL (1951) já tinha relacionado seu modelo estatístico com diversas aplicações para materiais como em fluência e fadiga.

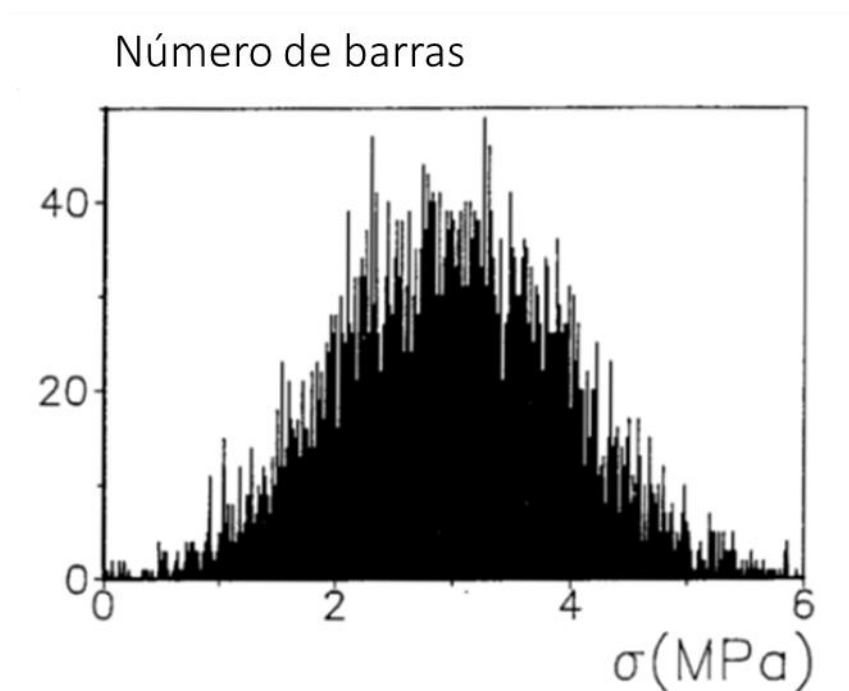


Figura 24 - Distribuição normal de resistência das barras (SCHLANGEN e VAN MIER, 1992)

Os resultados exibidos por Rossi et al. (1996), e mostrados nas Figuras 25 e 26 utilizando o modelo de simulação do LCPC, apontam resultados bem semelhante aos obtidos experimentalmente pelos autores. Schlangen e Van Mier (1992) também chegaram a resultados satisfatórios a partir do modelo de lattice proposto por eles.

Até mesmo em programas computacionais mais simples que gerem números aleatórios de acordo com a distribuição normal ou de Weibull para as faixas axiais pode gerar gráficos semelhantes ao da Figura 25, porém com menos precisão.

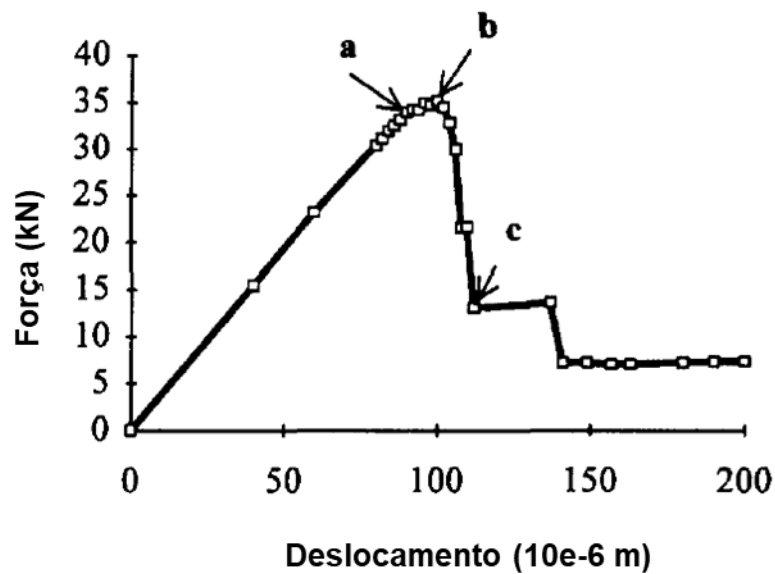


Figura 25 - Gráfico força-deformação obtido pelo modelo probabilístico (ROSSI et al., 1996)

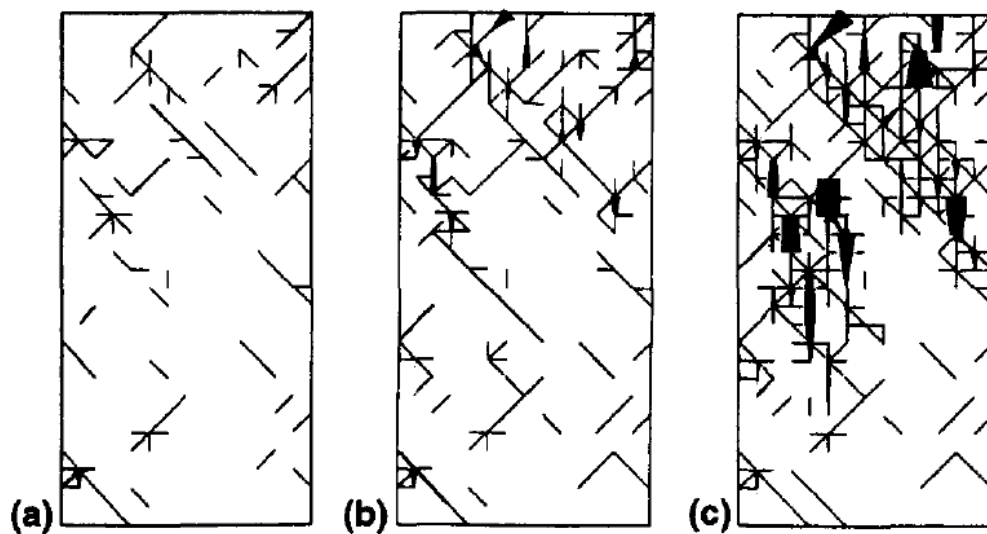


Figura 26 - Padrão de fratura obtido pelo modelo probabilístico (ROSSI et al., 1996)

Pesquisas de ROSSI et al. (1991), ROSSI e RICHER (1997) e WANG; YANG e JIVKOV (2015) mostram que alguns fatores podem influenciar diretamente na heterogeneidade do concreto como o tamanho do corpo de prova, quantidade de agregados no concreto e a quantidade de poros, devendo assim serem levados em conta em modelagens.

Apesar do vasto estudo de determinados grupos de pesquisa sobre o tema (ROSSI; RICHER, 1987; SCHLANGEN; VAN MIER, 1992; ROSSI et al., 1996), existem alguns aspectos que ainda precisam ser mais estudados para a complementação do modelo probabilístico, entre eles a hidratação. As pesquisas citadas acima utilizaram concreto com 28 dias de cura para os testes, de modo que a hidratação já é considerada completa para atingir a resistência desejada de uso. Desse modo, o estudo da heterogeneidade do concreto em diferentes graus de hidratação poderá ajudar no desenvolvimento de modelos mais adequados que fornecem maior precisão.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E DOSAGEM DO CONCRETO

Para a avaliação prática dos efeitos da heterogeneidade do concreto de acordo com o grau de hidratação, decidiu-se a utilização de um concreto simples de resistência de 40 MPa, constituído de cimento, brita e areia, sem utilização de superplastificante. A dosagem desse concreto será feita a partir do *software Betonlab pro 3*, desenvolvido pelo Central Laboratory Ponts Et Chaussees (LCPC) por LARRARD (1999) e sua equipe, que se utiliza do Método de Empacotamento Compressível (MEC).

Considerando que o concreto é um compósito em que partículas granulares (agregados) são unidas através de um material ligante (pasta de cimento), uma boa dosagem deve reduzir a porosidade entre os agregados de modo a consumir a menor quantidade de pasta de cimento possível, por motivos de custos e ambientais (LARRARD, 1999).

Os três parâmetros a serem considerados para alcançar a maior densidade possível são: tamanhos das partículas utilizadas, o formato dos grãos e o método de processo de empacotamento. Assim, a partir dessas características será calculada a densidade de empacotamento virtual, quando cada uma das partículas é colocada uma a uma mantendo sua forma original e alcançado a densidade máxima de empacotamento possível da mistura (LARRARD, 1999).

Por fim, o MEC deduz a partir da densidade de empacotamento virtual a densidade de empacotamento real da mistura utilizando um índice de compactação. Esse método encontra validação em resultados experimentais encontrados pelo próprio autor que considera também para esse cálculo efeitos de contorno de paredes e agregados (LARRARD, 1999).

As informações que o *Betonlab pro 3* necessita para aplicação do MEC na obtenção de uma dosagem adequada para a resistência desejada podem ser obtidas através da caracterização mostradas no Quadro 1 mostrado abaixo. Nele é possível ver, além da propriedade desejada, qual a normal ou modo de obtê-la.

Quadro 1 - Caracterização dos materiais

Caracterização para o MEC	Cimento	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Massa específica	Picnômetro de vidro/ NBR 16605 (2017)	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 52 (2009)
Absorção de água	-	NBR NM 53 (2009)	NBR NM 30 (2001)
Granulometria	Granulometria a laser	NBR NM 248 (2003)	NBR NM 248 (2003)
Compacidade	Demanda d'água	Protocolo de Empac. De Compressão + Vibração (K=9)	Compressão + Vibração
Composição química	Fluorescência de raio x	-	-
Resistência a compressão	NBR 7215 (1996)	-	-
Parâmetros p e q	-	Concreto – traço rico e traço pobre	Concreto – traço rico e traço pobre

Fonte: CORDEIRO (2006)

3.1 Cimento (Aglomerante)

Decidiu-se por utilizar o cimento do tipo CP II-E 32 da marca TUPY, devido ao efeito retardante da escória na hidratação do cimento, que permite maior janela de tempo para os ensaios mecânicos a serem feitos. Esse tipo de cimento segue a NBR 16697 (2018) nos que se refere as características físicas e químicas.



Figura 27 - CP II - E

Para a manutenção das características do cimento, os sacos foram empilhados sob estratos de madeira sem contato com o chão e armazenados em sacos plásticos grossos para não haver contato com umidade do ambiente.

3.1.1 Massa específica

A massa específica do cimento foi calculada a partir do picnômetro de vidro, que pode ser observado na Figura 28. Para esse experimento foram aquecidos 50 gramas do cimento na estufa a 60 °C por 2h para eliminar qualquer resquício de água no material. A massa específica obtida através da análise foi de 3,118 g/cm³.



Figura 28 - Picnômetro de vidro

3.1.2 Granulometria e finura de blaine

A granulometria do cimento foi feita utilizando-se um equipamento de granulometria à laser Malvern Mastersizer 2000, observado na Figura 29. Foi utilizado o método Fraunhofer em uma rotação de 2150 rpm e utilizando etanol como dispersante.



Figura 29 - Equipamento de granulometria à laser: Malvern Mastersizer

Os principais parâmetros de distribuição granulométrica obtidos através desse experimento são a massa do material acumulada abaixo dos diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , que representam os tamanhos de partículas abaixo dos quais se encontram 10%, 50% e 90% da massa do material, respectivamente.

Os valores obtidos para o cimento podem ser observados na Tabela 4, assim como a curva granulométrica do cimento na Figura 30.

Tabela 4 - Diâmetro em micrômetros (μm)

Massa acumulada	Diâmetro
D_{10}	2,809
D_{50}	14,961
D_{90}	52,567

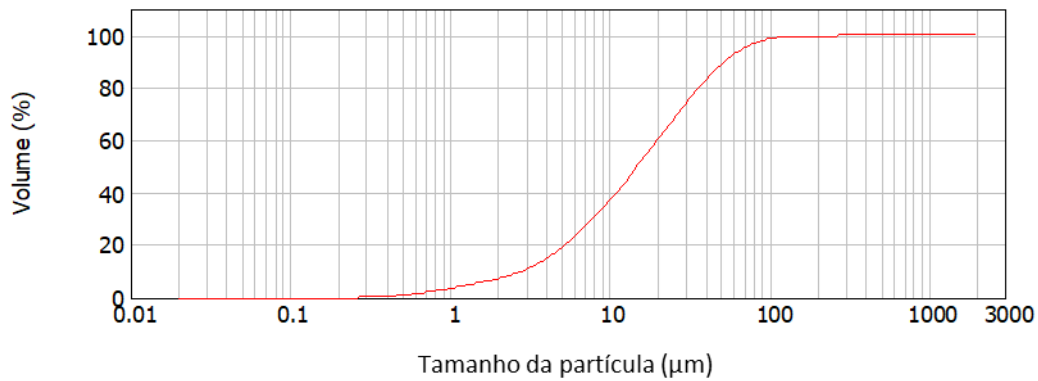


Figura 30 - Distribuição do tamanho de partículas do cimento

Já a finura de Blaine foi feita através do método de permeabilidade ao ar, seguindo a NBR NM 76 (1998), cujo equipamento pode ser observado na Figura 31. A finura do cimento é determinada como superfície específica, tendo seus resultados obtidos na unidade de área por massa. A análise do cimento resultou em uma finura (S) de valor $0,416 \text{ m}^2/\text{g}$.



Figura 31 - Equipamento de finura de Blaine

3.1.3 Composição química

Para analisar a composição química, primeiramente é necessário que seja feito o ensaio de perda ao fogo, de modo a determinar a quantidade de matéria orgânica existente no cimento. Para esse ensaio, segue-se a norma NBR NM 18 (2004), em que foi

necessário utilizar o segundo método, devido a existência de escória de alto forno no cimento utilizado.

Para a composição química foi feita uma análise espectrometria de fluorescência de raios X, nesse método o raio X é emitido na amostra e absorvidos pelos elétrons que saem de sua órbita gerando instabilidade, ao retornar para ela, eles emitem uma radiação característica chamada fluorescência que permite identificar o átomo.

Para a realização desse experimento foram feitas pastilhas de cimento através de compressão por pressão (Figura 32) que foram analisadas pelo equipamento Shimadzu EDX-720 que pode ser observado na Figura 33.



Figura 32 - Pressão por compressão



Figura 33 - Shimadzu EDX-720

Por fim, a composição química do cimento obtida através dessa análise, pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do cimento CII-E

Composto	Porcentagem (%)
CaO	55,73
SiO ₂	21,43
Al ₂ O ₃	6,03
SO ₃	3,89
MgO	2,39
Fe ₂ O ₃	2,13
K ₂ O	0,98
Na ₂ O	0,47
TiO ₂	0,28
MnO	0,27
SrO	0,26
P ₂ O ₅	0,13
Perda ao fogo	6,04
Total	100,00

3.1.4 Resistência à compressão

No ensaio de resistência à compressão é utilizada a NBR 7215 (1996), em quem serão ensaiados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, com argamassa de uma parte de cimento para três de areia normalizada e fator água-cimento de 0,48.

Foram feitos 4 corpos de prova para cada idade de rompimento, que foram 1, 3, 7 e 28 dias. A cura inicial foi feita em câmara úmida até as primeiras horas, sendo então colocados submersos em um tanque com água. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à compressão do cimento (MPa)				
Dia	Amostra			Média
	1	2	3	
1	12,55	11,65	11,40	11,87
3	24,25	25,10	23,40	24,25
7	37,30	37,30	37,10	37,23
28	57,20	56,45	54,70	56,12



(a)



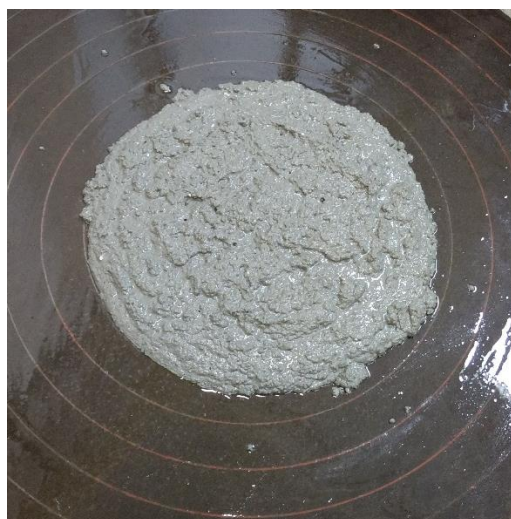
(b)

Figura 34 - Preparação (a) e rompimento (b) da argamassa de cimento

A norma define como obrigatório a determinação do índice de consistência da massa de cimento. O ensaio é feito em um tronco de cone e em uma mesa de abatimento próprios para esse ensaio e especificados na NBR 7215 (1996). O resultado consiste na média entre a medida de dois resultados do procedimento. Os equipamentos e resultados podem ser observados na Figura 35.



(a)



(b)

Figura 35 - Ensaio de índice de consistência da massa de cimento

3.1.5 Compacidade

A compacidade experimental do cimento da mistura foi calculada a partir do método da demanda d'água, com base nos procedimentos sugeridos por DE LARRARD (1999).

O procedimento consiste em colocar 350 gramas de cimento no misturador planetário com uma quantidade crescente de água a ser medida através da massa de uma pisseta. Inicialmente deve-se ligar o misturador na velocidade baixa e bater a mistura por 1 minuto, acrescentando com a pisseta um pouco de água. Posteriormente se aumenta para a velocidade máxima o misturador. O ensaio consiste no acréscimo lento e progressivo de água, a fim de obter uma pasta com o máximo de empacotamento das partículas.

Durante esse processo, com o aumento da quantidade de água, a pasta de cimento passa por mudanças de fases que são visíveis ao olho nu, essas fases são: estado seco, estado pendular, estado funicular e estado capilar. O final do teste de demanda d'água corresponde ao último estado mencionado em que é visível a formação de três diferentes folhas, como na Figura 36.



Figura 36 - Estado capilar (máximo empacotamento das partículas)

O experimento deve ser feito num período médio de 10 minutos, em que o resultado obtido é a quantidade de água em gramas. A obtenção do valor de demanda d'água é obtido a partir da equação abaixo:

$$C = \frac{1}{1 + \delta \cdot \frac{m_a}{m}} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

C - demanda d'água;

δ - massa específica do material (g/cm³);

m_a - massa de água (g);

m - massa do material (g).

Os resultados obtidos pelo ensaio da compacidade experimental e dos cálculos realizados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado da compacidade experimental				
Ensaio	1	2	3	4
Massa de cimento (g)	350	350	350	350
Massa de água (g)	85,54	84,04	84,56	87,49
Massa específica (g/cm ³)	3,118	3,118	3,118	3,118
Compacidade	0,5675	0,5719	0,5704	0,5620
Compacidade média	0,5679			

3.2 Agregados naturais

Os agregados utilizados na mistura de concreto são areia e brita 0 (diâmetro máximo de 9,5 mm). Antes da caracterização todo o montante foi seco em uma sala de temperatura 40 °C e homogeneizado. O material foi armazenado em sacos plásticos fechados dentro de bombonas de 200 L para evitar absorção de água e impurezas.



(a)



(b)

Figura 37 - Agregados utilizados: areia (a) e brita 0 (b)

Na Figura 38 é possível observar as pilas cônica e alongada de homogeneização da areia e da brita 0.



(a)



(b)

Figura 38 - Pilhas de homogeneização da areia (a) e brita 0 (b)

3.2.1 Massa específica e absorção de água

O ensaio de massa específica dos agregados é feito por normas diferentes, a NBR NM 52 (2009) se refere a areia e a NBR NM 53 (2009) a brita, já a absorção de água dos agregados é feita por normas diferentes, a NBR NM 30 (2001) se refere a areia e a NBR NM 53 (2009) a brita.

Para a absorção de água da areia, foi utilizada uma amostra de 1 kg de agregado miúdo, secadas em uma estufa de 100 °C até ser obtida massa constante e esfriadas em temperatura ambiente por 3 horas. A amostra foi pesada e submersa em água por 24 horas, quando foi retirada da água, estendida sobre uma superfície plana e submetida a uma corrente de ar quente uniforme até que os grãos não fiquem fortemente aderidos entre si. Esse estado é verificado através da utilização de um molde em formato de tronco de cone, no qual a areia deve ser colocada dentro e comprimida com 25 golpes de uma haste de compactação. Retirado o cone após o procedimento, o desmoronamento da areia indica a chegada no ponto de chegada à condição de saturado superfície seca, devendo então ser pesado (m_s). A areia deve então ser novamente seca até a massa constante e pesada (m).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

A - absorção de água (%);

m - massa da amostra seca (g);

m_s - massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g).

Para o cálculo, utiliza-se 500 g de areia em condição saturada de superfície seca, colocando-a em um recipiente com marcação de 500 mL e pesar o conjunto (m_1), então encher até a marcação de 500 mL, eliminando as bolhas de ar. Após uma hora, completar com água até a marcação de 500 mL e medir o conjunto (m_2). Retirar o agregado miúdo do frasco, secar a temperatura de 100 °C e medir até a massa constante (m).

$$d = \frac{m}{V - V_a} \quad \text{Equação 25}$$

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad \text{Equação 26}$$

d - a massa específica aparente do agregado seco (g/cm³);

m - é a massa da amostra seca em estufa (g);

V - volume do frasco (cm³);

V_a - volume de água adicionada ao frasco (cm³);

m_1 - massa do conjunto frasco e agregado (g);

m_2 - massa total frasco, agregado e água (g);

ρ_a - massa específica da água (g/cm³).

Para a brita, uma amostra de aproximadamente 2 kg foram, lavadas, secadas em estufa de 100 °C e esfriadas a temperatura ambiente por 3 horas. A amostra foi pesada e então submersa em água, por 24 horas, quando foi retirada, secada com um pano e novamente pesada, obtendo-se m_s (massa seca). A amostra é então colocada em um cesto de arame com abertura de malhas e novamente submersa em água, sendo pesada novamente e obtendo-se o m_a (massa em água). Por último, a brita é seca na estufa de 100 °C até atingir massa constante, sendo então esfriada a temperatura ambiente por 3h e novamente pesada, obtendo-se m (massa ao ar da amostra seca).

A partir disso foi possível o cálculo da massa específica da brita seca e a absorção de água a partir das equações 27 e 28, respectivamente.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad \text{Equação 27}$$

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

d - é a massa específica do agregado seco (g/cm³);

A - é a absorção de água (%);

m - massa da amostra seca (g);

m_a - é a massa em água da amostra (g);

m_s - é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca (g).

Tabela 8 - Propriedades físicas dos agregados

Propriedades físicas	Areia	Brita
Massa específica (kg/m ³)	2370,87	2873,01
Absorção de água (%)	0,74	1,39

3.2.2 Granulometria

O ensaio de granulometria dos dois agregados é normatizado pela NBR NM 248 (2003). Primeiramente para a homogeneização total da amostra utilizada foi feito o quartejamento do material a partir do quarteador de Jones, mostrado na Figura 39.



Figura 39 - Quarteador de Jones

O peneiramento foi feito na brita e na areia utilizando 6 peneiras para cada um deles de acordo com o especificado na norma e observando a características granulométricas de cada agregado (Figura 40).



Figura 40 - Ro-tap

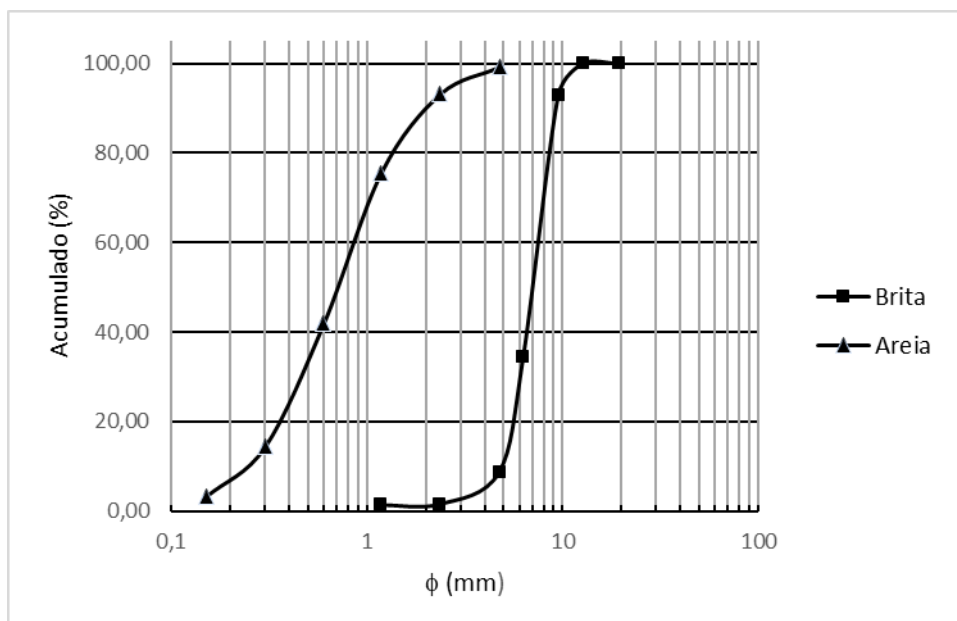


Figura 41 - Curva granulométrica dos agregados

Tabela 9 - Característica granulométrica da brita 0

Peneira	Brita
19,0 mm	0,00 %
12,5 mm	0,00 %
9,5 mm	7,12 %
6,3 mm	58,52 %
4,75 mm	25,71 %
2,36 mm	7,15 %
1,18 mm	0,19 %
Fundo	1,31 %
Diâmetro máximo	9,52 mm
Módulo de finura	3,96

Tabela 10 - Característica granulométrica da areia	
Peneira	Areia
4,75 mm	0,91 %
2,36 mm	6,05 %
1,18 mm	17,50 %
600	33,65 %
300	27,68 %
150	11,13 %
Fundo	3,07 %
Diâmetro máximo	4,75 mm
Módulo de finura	3,73

3.2.3 Ensaio de compressão e vibração

A compactidade experimental dos agregados necessária para o MEC deve ser feita a partir do ensaio de compressão e vibração, realizado para partículas maiores que 100 μm . O ensaio foi proposto por DE LARRARD (1999) e adaptado por SILVA (2004), nele foi utilizado um cilindro metálico, de 160 mm de diâmetro e 320 mm de altura, preso a uma mesa vibratória e com uma pressão de 10 kPa acima do agregado, através de um pistão maciço de 200 N.

Após a colocação do pistão acima do agregado, é registrado a altura a partir de um catetômetro, equipamento específico para esse tipo de medição. Em seguida, aciona-se a mesa vibratória com frequência igual a 68 Hz, por 3 minutos. Após esse tempo, a altura do material compactado é determinada, anotando-se a altura final do pistão.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 42 - Ensaio de Compressão e Vibração

Para os agregados graúdos, foram utilizados 7,0 kg de material, enquanto que para os agregados miúdos, utilizou-se 3,0 kg de material. A partir dos resultados obtidos no experimento a compactidade experimental é calculada a partir da seguinte equação.

$$C = \frac{4.M_s}{\pi.D_c^2.h.\delta} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

C - compacidade experimental;

M_s - massa de material seco (g);

D_c - diâmetro interno do cilindro (cm);

h - altura da camada de material compactada ao final do ensaio (g);

δ é a massa específica do material (g/cm³).

Tabela 11 - Resultados do ensaio de compacidade

Ensaio	Areia	Brita
1	0,7506	0,6208
2	0,7374	0,6240
3	0,7474	0,6594
Média	0,7451	0,6347

3.2.4 Parâmetros “p” e “q”

Para a utilização apropriada da do MEC no *Betonlab pro 3* é necessário a utilização de dois parâmetros relacionados aos agregados: “p” e “q”. O primeiro relaciona-se a ligação entre a pasta e o agregado e o segundo à resistência própria do agregado. Esses parâmetros devem ser calculados para cada tipo de agregado utilizado na mistura (LARRARD, 1999).

Para o cálculo desses parâmetros para ambos agregados, areia e brita 0, foram feitas duas misturas diferentes, argamassa e concreto. Desse modo foram produzidos dois traços de cada tipo de mistura, sendo um de alta resistência, denominado Traço Rico (TR), e um de baixa resistência, Traço Pobre (TP). Os traços utilizados podem ser observados na Tabela 12

Tabela 12 - Composição dos traços para calibração dos parâmetros "p" e "q"

Mistura		Materiais (kg/m³)			
		Cimento	Água	Areia	Brita 0
Concreto	Traço Rico	499,86	200,03	599,92	1000,14
	Traço Pobre	250,14	190,02	800,03	1000,14
Argamassa	Traço Rico	620,01	272,64	1400,56	-
	Traço Pobre	340,45	250,50	1599,85	-

Os resultados para ensaios mecânicos de compressão simples de cada um desses traços de concreto e argamassa para 3, 7 e 28 dias de cura em câmara úmida podem ser observados na Tabela 13. Para argamassa, foram utilizados corpos de provas cilíndricos de 5x10 cm e para concreto corpos de prova de 7,5x15 cm, sendo 4 corpos de prova para cada dia e cada traço.

Tabela 13 - Resistência a compressão para calibração dos parâmetros "p" e "q"

Mistura		Resistência (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Concreto	Traço Rico	23,01	32,35	39,61
	Traço Pobre	6,20	8,95	13,46
Argamassa	Traço Rico	17,98	23,05	24,73
	Traço Pobre	3,89	5,90	8,26

Tabela 14 - Resultados dos parâmetros "p" e "q"

p	q
0,474	0,00103

3.3 Dosagem do Concreto

Como dito anteriormente a dosagem do concreto será feita a partir do *software Bentonlab Pro 3*, desenvolvido a partir do MEC desenvolvido por De Larrad. A utilização do programa consiste em três etapas: criação de um bando de dados com os materiais a serem utilizados, calibração dos parâmetros “p” e “q” e por último a dosagem do concreto.

O passo a passo na utilização do *software* pode ser observado no apêndice A do trabalho e o resultado da dosagem na Tabela 15.

Tabela 15 - Dosagem do cimento	
Componentes	Quantidade (kg/m ³ de concreto)
Brita 0	1169,1
Areia	519,5
Cimento	550,0
Água	210,1

A dosagem foi aferida através da moldagem e rompimento de 6 corpos de prova de 75x150 mm em uma velocidade de 0,3 mm/min. Os resultados estão na Tabela 16 e mostraram-se compatíveis com o esperado.

Tabela 16 - Resistencia a compressão da dosagem	
Corpo de prova	Resistencia compressão (MPa)
1	42,69
2	42,21
3	39,27
4	42,85
5	38,77
6	41,17
Média	41,16

4 MÉTODOS DE ENSAIO

Para o estudo da heterogeneidade do concreto foi utilizada uma combinação de ensaios de calorimetria adiabática com ensaios mecânicos com o objetivo de se obter a resistência a compressão e flexão de corpos de prova do concreto em diferentes graus de hidratação.

Para se entender esses procedimentos em conjunto é preciso primeiramente compreendê-los separadamente. Este capítulo vai tratar sobre esses dois tipos de ensaio, da forma como eles são combinados e também da análise estatística utilizada para analisar os resultados dos ensaios mecânicos.

4.1 Métodos de ensaios calorimétricos

Segundo Wadsö et al. (2016) a calorimetria é a medida de calor e do grau de produção de calor, sendo um processo genérico que pode ser relacionado com mudanças entálpicas. Essas medidas podem ser diretamente relacionadas a hidratação do concreto, já que ela se trata de uma reação exotérmica e termoativada.

Nesse sentido o calorímetro adiabático mostra-se como um equipamento capaz de fornecer a evolução do grau de hidratação do concreto, a partir da concepção mostrada no capítulo 2. Em um ambiente adiabático, todo o calor liberado pela reação de hidratação do concreto é absorvido pela matéria, resultando em elevação de temperatura.

A NBR 12819 (2012) define a elevação adiabática de temperatura do concreto como “elevação da temperatura do concreto causada pelo calor gerado da hidratação do cimento, em condições adiabáticas, ou seja, sem trocas de calor com o ambiente”. Assim, a relação entre a elevação adiabática total e a elevação adiabática em determinado tempo, como mostrado na equação 13, permite o cálculo do grau de hidratação.

O sistema adiabático é obtido através de um corpo de concreto isolado e submerso em um banho de água em constante circulação, ambos com suas temperaturas medidas por um termômetro. No início do processo ambos possuem temperatura igual ou próxima, com o aumento da temperatura do concreto devido às reações exotérmicas, o banho de água tem sua temperatura aumentada por resistências elétricas ligadas a um controlador que capta as duas temperaturas. Um esquema em corte do calorímetro

adiabático juntamente com a foto do que foi utilizado no trabalho pode ser observado na Figura 43.

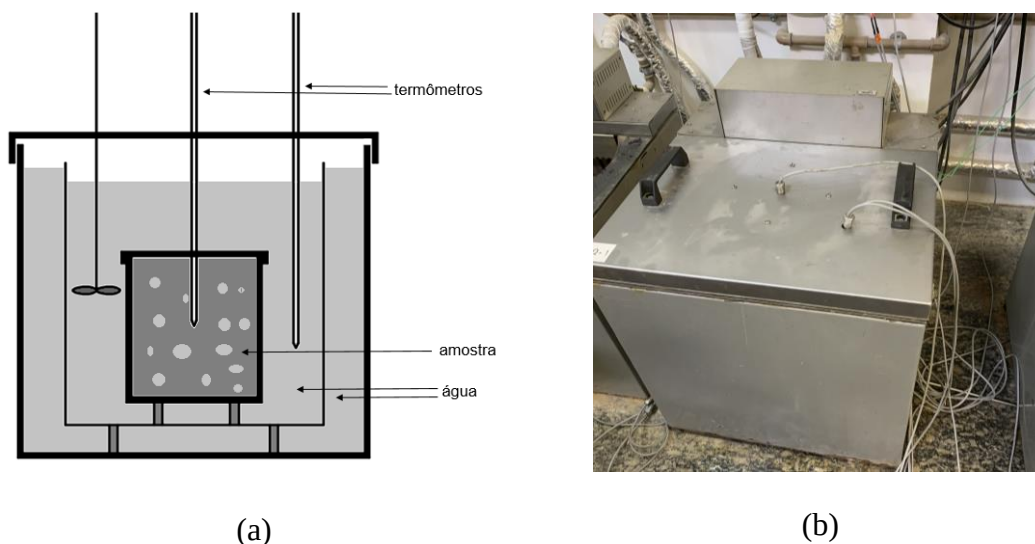


Figura 43 - Calorímetro adiabático (a) esquema em corte; (b) foto do calorímetro

Para a produção do concreto e utilização do calorímetro adiabático alguns procedimentos foram adotados com objetivo de torná-lo mais similar possível todas as misturas. Estas etapas se basearam principalmente na NBR 12819 (2012) e na NBR 12821 (2009). O passo a passo das misturas será descrito abaixo.

A temperatura da sala onde foi realizada a moldagem do concreto e dos materiais era variável, de acordo com a temperatura desejada para a mistura. Para misturas convencionais tanto os materiais quanto a sala estavam a uma temperatura de 21 °C antes da mistura. Para misturas frias os materiais foram colocados durante duas horas em uma câmara resfriada a temperatura de 4 °C e a sala colocada a uma temperatura de 18 °C, já para misturas quentes os materiais foram colocados durante duas horas em uma câmara quente a uma temperatura de 40 °C e o ar condicionado da sala foi desligado.

Na produção do concreto, o cuidado com a técnica foi máximo, baseando na NBR 12821 (2009). Primeiramente, os agregados graúdos e miúdos foram misturados com cerca de um terço da água durante 30 segundos em uma betoneira. Adicionou-se à mistura o cimento com mais um terço da água total, misturando-se por mais 30 segundos na betoneira. Ao final, adicionou-se o resto da água, sendo o concreto misturado por mais 5 minutos até atingir a homogeneidade.

Após a mistura do concreto, ele foi colocado no recipiente do calorímetro adiabático. O recipiente foi forrado por um isopor fino besuntado por óleo para facilitar a retirada, então foi colocado um saco plástico resistente para receber o concreto. Colocou-se então uma primeira camada de 2 kg de concreto que foi vibrado durante 30 segundos, complementando então com mais 1,74 kg de concreto e vibrando por mais 30 segundos a segunda camada. Esse peso foi escolhido por ser semelhante a um corpo de prova cilíndrico de 15 x 30 cm e por preencher suficientemente o recipiente do calorímetro adiabático. Os procedimentos podem ser observados na Figura 44 abaixo.

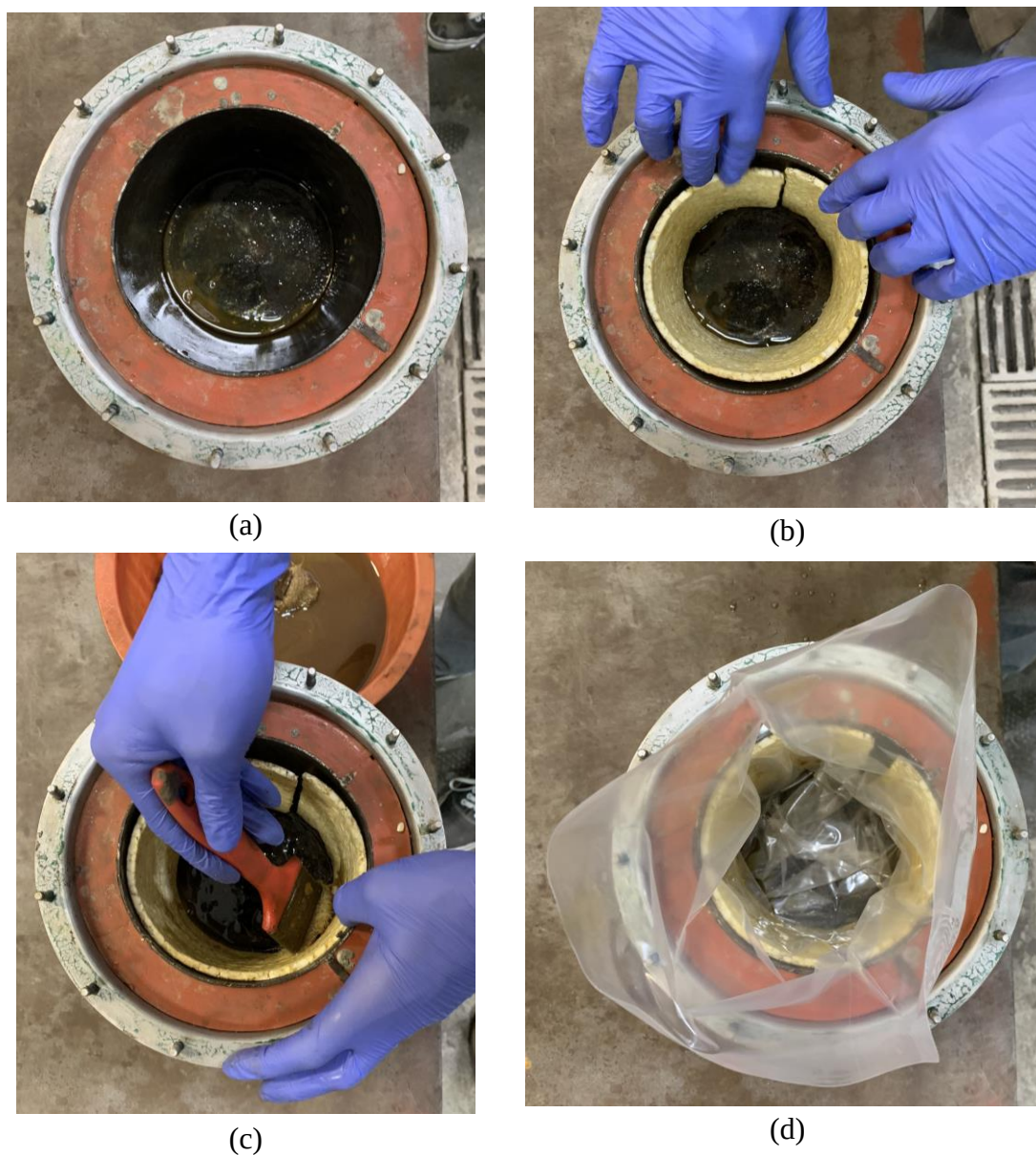


Figura 44 - Preparação da câmara interna (a) câmara interna; (b) revestimento de isopor; (c) lubrificação do recipiente; (d) saco para recebimento do concreto

Ao final da vibração foi colocado no centro da massa de concreto um tubo de ferro fechado em uma das pontas cheio de óleo internamente, onde para colocar o termômetro do calorímetro adiabático. O óleo tem o objetivo de facilitar a absorção da energia emitida pelo concreto. Estas etapas podem ser observadas na Figura 45.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 45 – Moldagem (a) concreto vibrado; (b) tubo metálico com óleo; (c) encaixe do tubo; (d) câmara interna pronta para ser fechada

Com o recipiente de concreto preparado, ele foi fechado com uma tampa vedada com um oringue colado através de graxa. A tampa foi fechada com parafusos e então imersa no banho do calorímetro adiabático.



(a)



(b)

Figura 46 - Fechando o calorímetro adiabático (a) tampa do calorímetro; (b) câmara interna sendo fechada

O experimento foi repetido várias vezes, variando a temperatura inicial e o calorímetro com o objetivo de verificar os resultados, que se mostraram consistentes e serão apresentados no capítulo seguinte.

Para os ensaios mecânicos do concreto em diferentes graus de hidratação, foi preciso que os corpos de prova moldados juntamente com o concreto da câmara interna hidratassem igualmente. Assim, associado ao calorímetro adiabático, foi utilizado um tanque de água de temperatura controlada.

O tanque possui um controlador que objetiva igualar a temperatura da água ao banho do calorímetro adiabático. Corpos de prova do concreto fabricado na mesma mistura utilizada no calorímetro foram colocados no tanque para que a hidratação desses acompanhassem a reação do corpo de prova dentro do equipamento.

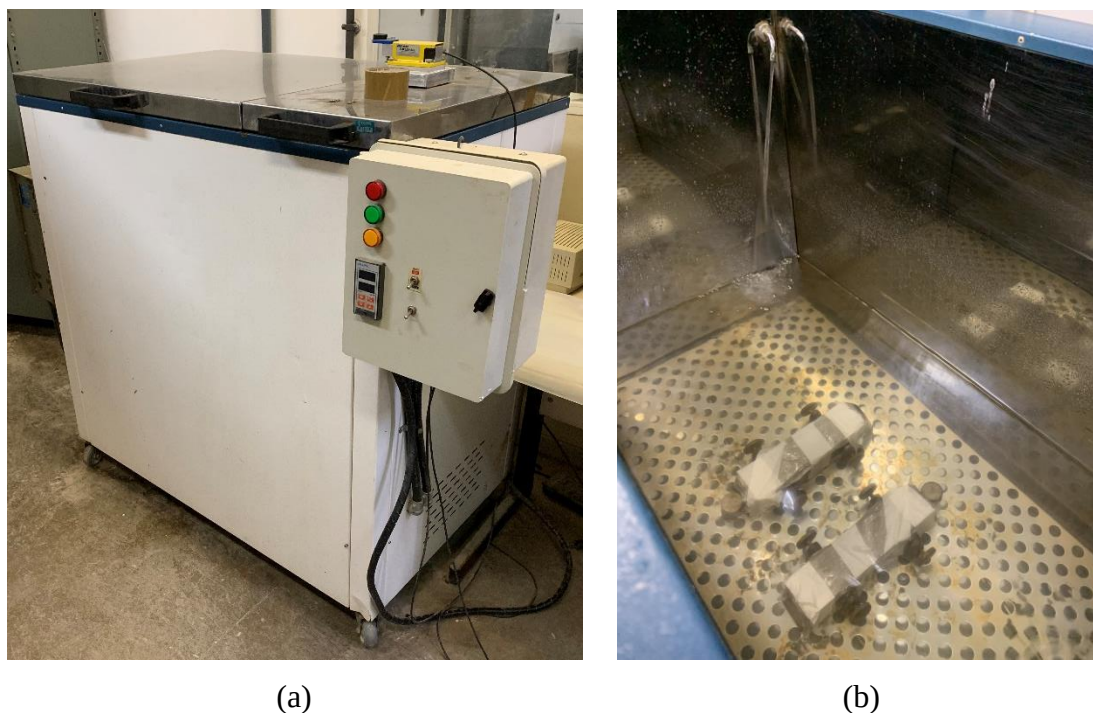


Figura 47 - Tanque de água ligado ao calorímetro (a) vista externa; (b) vista interna

Objetivando evitar a lixiviação do material dos corpos de prova, todas suas bordas foram revestidas com graxa náutica resistente a água e a abertura foi vedada com plástico filme e presa com fita crepe, de modo que os corpos de prova estejam semi-selados. O processo pode ser observado na Figura 48.

Já com a hidratação dos concretos da câmara interna do calorímetro e dos corpos de prova no tanque de água ocorrendo simultaneamente e no mesmo grau, para os ensaios mecânicos. Foi necessária a retirada dos corpos de provas em faixas de hidratação determinadas. Essas faixas são baseadas na elevação adiabática total obtida a partir de ensaios de 90 horas no calorímetro, quando em todos os casos constatou-se que a reação deixou de ser significativa ao ponto de aumentar a temperatura.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 48 - Revestimento dos corpos de prova com (a) papel filme e (b) fita crepe

Decidiu-se por ensaiar os corpos de prova com 25%, 50%, 75% e 100% de hidratação, sendo a última considerada a partir de 90 horas de experimento. Devido às variações experimentais corriqueiras como pequenas diferenças na elevação adiabática total e o tempo de preparação do corpo de prova e ensaios mecânicos, foi definida uma variabilidade máxima de 5% para mais ou para menos nos casos de hidratação não completa.

Desse modo, a retirada dos corpos de prova foi feita no momento referente a percentagem inferior referente ao valor esperado de elevação adiabática da mistura para as 90 horas de experimento.

4.2 Métodos de ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos feitos podem ser divididos entre compressão e flexão.

O ensaio de compressão se baseou na NBR 5739 (2018) e foi feito na máquina *Shimadzu*, modelo *UH-F1000 kN* de carga máxima com dois *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) de 5 mm apoiados em lados opostos de um suporte de 10 cm de altura encaixado de forma centralizada no cilindro. O corpo de prova utilizado foi 7,5 x 15 cm e passou pelo processo de faceamento antes dos ensaios para que ele fosse feito nivelado com a superfície do equipamento.

O corpo de prova antes e durante o ensaio pode ser observado na Figura 49.



(a)



(b)

Figura 49 – Corpo de prova antes (a) e durante (b) o ensaio de compressão

O ensaio de flexão foi feito com 4 pontos, separados a 16 cm na face inferior e 6 cm na face superior. O ensaio foi feito na máquina *Shimadzu* modelo *AG-X* com carga máxima de 100 kN de carga máxima e foram utilizados sempre dois LVDTs, um deles acoplado na própria máquina e em contato com a parte inferior do corpo de prova e outro em um suporte preso ao redor do corpo de prova e em contato com uma haste também presa ao corpo.



Figura 50 – Corpo de prova durante o ensaio de flexão

No caso dos corpos de prova de flexão sempre foi feita a verificação se a fissura ocorreu entre os dois apoios superiores do equipamento.



(a)



(b)

Figura 51 - Corpo de prova de flexão antes (a) e após (b) ensaio

A velocidade em ambos os ensaios foi de 0,3 mm/min.

4.3 Métodos de análise dos resultados mecânicos

Os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos vêm em forma de força e deslocamento, grandezas absolutas, quem na maioria dos casos precisam ser transformados em grandezas relativas para ser utilizados para análise estatística posterior.

A compressão (σ) e deformação (ε) são facilmente extraídos, para o primeiro deve se dividir a força (F) pela área (A) como mostra na Equação 30 e para o segundo divide-se o deslocamento (d) pela distância do corpo de prova abrangido pelos LVDTs (L), como mostra na Equação 31.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 30}$$

$$\varepsilon = \frac{d}{L} \quad \text{Equação 31}$$

O modo de elasticidade (E) é calculado utilizando-se a lei de Young (Equação 32), considerando o trecho elástico do ensaio, observado através do gráfico tensão deformação traçado pelo *software Excel*.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Equação 32}$$

No ensaio de flexão de 4 pontos deseja-se extrair a tração de ruptura do concreto, como se trata de um ensaio em 4 pontos, no centro da viga ocorre apenas o esforço de flexão puro cujo momento (M) pode ser calculado a partir da Equação 33, onde c é a distância entre dois apoios de um mesmo lado do corpo de prova.

$$M = \frac{F}{2} \times c \quad \text{Equação 33}$$

A partir do momento máximo calcula a tração que ocorre nas fibras inferiores do concreto e que causarão a ruptura do material, para isso utiliza-se a equação da mecânica dos sólidos (Equação 34) que será desenvolvida para o saco específico gerando a Equação 35.

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} \quad \text{Equação 34}$$

$$\sigma = \frac{3F \times c}{bh^2} \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

y – distância da linha neutra a extremidade;

I – momento de inércia do corpo de prova;

b – tamanho da base do corpo de prova;

h – altura do corpo de prova.

O módulo de elasticidade em um ensaio de flexão de 4 pontos pode ser calculado a partir da equação de deflexão de uma viga (v) para esse caso mostrado na Equação 36. Isolando-se o módulo de elasticidade e definindo o trecho elástico a equação é simplificada para a Equação 37.

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{F \times c}{48EI} \times (3L^2 - 4c^2) \quad \text{Equação 36}$$

$$E = \frac{c}{4bh^3} (3L^2 - 4c^2) \frac{\Delta F}{\Delta v} \quad \text{Equação 37}$$

4.4 Métodos de análise do patamar de percolação

O método de medição do pulso ultrassônico, medido através do aparelho *Ultrasonic Cement Analyzer* (UCA), tem como objetivo identificar o momento da mudança do patamar de percolação do concreto e analisar a cinética de hidratação. Para o trabalho apenas esse primeiro será levado em conta.

Para esse ensaio foi utilizado a um UCA modelo 5265 SGSA da marca *Chandler Engineering* (Figura 52), do Laboratório de Cimentação da COPPE/UFRJ. O ensaio foi programado para manter a temperatura de 23,5 °C e pressão de 1 atm com a duração de uma semana.

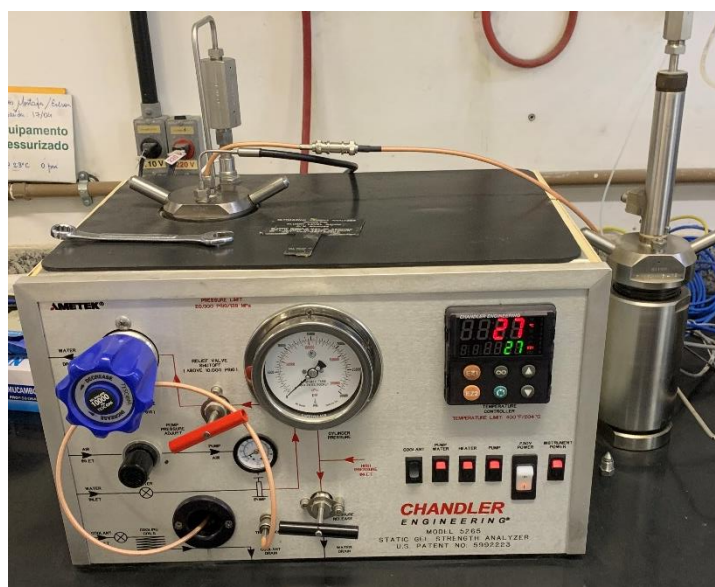


Figura 52 - Equipamento para aquisição de dados para o ensaio de pulso ultrassônico

O modo como o pulso ultrassônico atravessa o material depende diretamente do seu estado físico, de modo que a variação desse pulso tende a indicar a mudança do estado de dispersão para sólido.

4.5 Métodos de análise estatística

Os parâmetros estatísticos utilizados foram diversos e diferenciados dependendo do tipo de análise utilizados. Decidiu-se por fazer dois tipos de análises de dispersão de

resultados mecânicos: dispersão dos resultados em relação a uma linha de tendência e dispersão dos resultados entre si. Para isso foram utilizados dois *softwares*: *OriginPro 8* e *Excel*.

A linha de tendência foi traçada utilizado a função *Fit Polynomial*, a partir da qual decide-se qual o polinômio que mais se adequa a tendência dos resultados, dando preferência para polinômios de baixo grau. A função além da curva fornece o valor de R^2 , que demonstra a representatividade da curva em relação ao resultado, quando mais perto do valor 1, mais representativo.

A dispersão dos resultados em relação a linha de tendência foi feita a partir do desvio quadrático médio, em que são comparados os pontos experimentais com o resultado do ponto de igual hidratação na curva de tendência. O cálculo do desvio quadrático médio pode ser visto na Equação 38.

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta x_i^2}{n}} \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

S_{rms} – desvio médio quadrático;

n – número de amostras;

δx – desvio da amostra em relação a linha de tendência.

Na dispersão dos resultados entre si utilizou-se parâmetros estatísticos básicos e que permitem uma clara análise da variação. Foram 3 parâmetros absolutos, média, desvio padrão e variância, e um parâmetro relativo, o coeficiente de variação.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O roteiro experimental do trabalho foi dividido em duas partes: calorimetrias adiabáticas e ensaios mecânicos. A apresentação e análise dos resultados da dissertação também seguirão essa divisão para a facilidade de compreensão.

Na primeira parte foram analisados os resultados das calorimetrias adiabáticas, assim como as dificuldades encontradas durante a pesquisa e como elas foram superadas de modo a se conseguir ensaiar corpos de prova de concreto em baixas idades sabendo o grau de hidratação de forma precisa. A segunda parte apresenta os resultados dos ensaios de compressão e flexão, extrai deles características mecânicas importantes e as relaciona com o grau de hidratação do momento do ensaio.

5.1 Calorimetria adiabática

A exigência de graus de hidratação precisos relacionados aos ensaios mecânicos levou a uma análise minuciosa das calorimetrias adiabáticas obtidas experimentalmente, de acordo com o relatado no capítulo anterior.

A elevação adiabática de um concreto depende principalmente da quantidade de cimento contido nele. Segundo Neville; Brooks apud Fitzgibbon (2010) a elevação adiabática final é de $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ de cimento. Utilizando-se informações do fornecedor de que o CP II – E utilizado possui 47,5 % de clínquer e que a quantidade utilizada de cimento no concreto foi de 550 kg/m^3 tem-se um valor $31,35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Considerando-se ainda efeitos exotérmicos da escória de alto forno do cimento (KOLANI et al., 2012), espera-se que esse seja o mínimo de uma elevação adiabática.

Os primeiros resultados feitos com a temperatura inicial de $21,4$ e $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mostraram convergentes, tanto em temperatura final, como na evolução de temperatura ao longo do tempo, atestando sua repetitividade, como pode ser observado na Figura 53.

Ensaio mais longos mostraram que a partir das 90 horas de ensaio as variações de temperatura são mínimas ou nulas, considerando então que parte considerável da reação de hidratação já ocorreu nesse período para o concreto dosado nesta pesquisa.

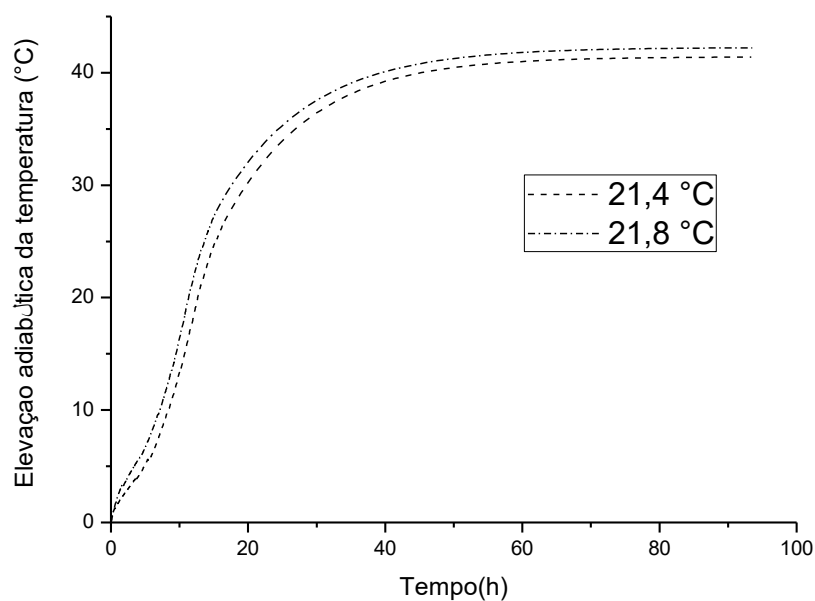


Figura 53 - Elevação adiabática do concreto

A similaridade das curvas foi feita comparando o eixo y de ambas, que idealmente deveria ser uma reta $x = y$. Isso pode ser observado na Figura 54, nela se observa que, apesar da linha que representa melhor o resultado não ser igual a descrita anteriormente, a aproximação é visível, assim como a semelhança entre o resultado e a linha de tendência expressa no valor de R^2 próximo ao valor de 1 (semelhança total).

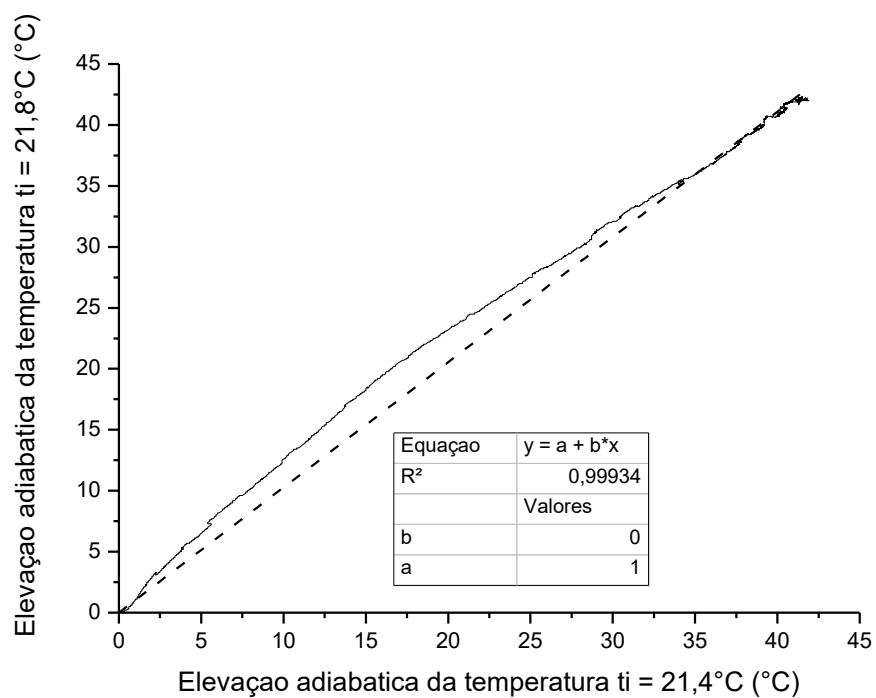


Figura 54 - Comparativo entre curvas adiabáticas de diferentes temperaturas iniciais

Provada a repetitividade dos resultados obtidos no calorímetro adiabático, considerou-se então que o equipamento estava com o funcionamento adequado.

Ao longo dos ensaios conjugados de calorimetria adiabática e ensaios mecânicos, quando para se obter corpos de prova em baixos graus de hidratação foram utilizadas temperaturas iniciais diferentes das utilizadas inicialmente (15,1; 21,8 e 24,4 °C), para representar uma temperatura baixa, uma média e uma alta. Observou-se, então, algumas disparidades entre curvas de elevação adiabática iniciadas em diferentes temperaturas, mostradas nas Figura 55 e Figura 56.

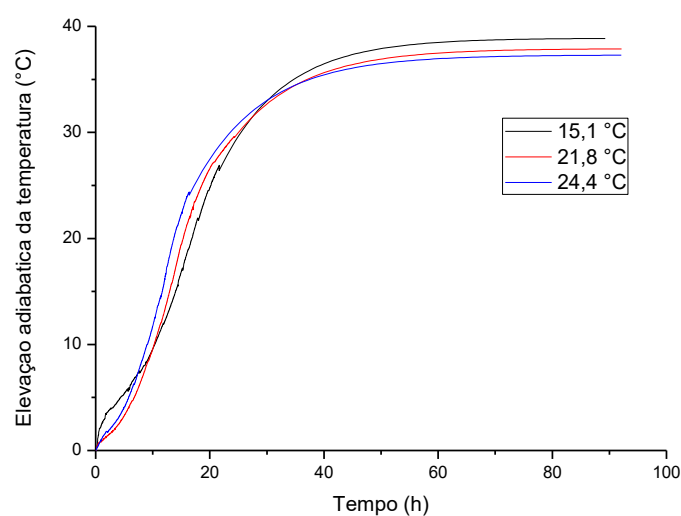


Figura 55 - Elevação adiabática para diferentes temperaturas iniciais (escala linear)

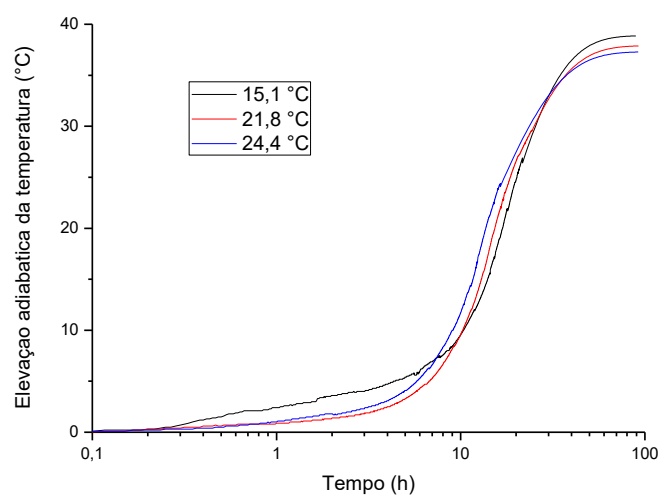


Figura 56 - Elevação adiabática para diferentes temperaturas iniciais (escala logarítmica)

Utilizando-se como base Fairbairn (2001), os gráficos apresentam divergências entre os resultados experimentais e o que a teoria tem a mostrar considerando a elevação adiabática total e velocidade das reações.

A característica de termoativação do concreto leva a crer que maiores temperaturas iniciais resultam em reações mais rápidas de hidratação, consequentemente mais calor liberado e maior elevação adiabática durante toda a curva. Apesar disso, os resultados mostraram que nas primeiras horas, a velocidade da maior temperatura (24,4 °C) era inferior ao de menor temperatura (15,1 °C). Já nas últimas horas, a elevação de 24,4 °C é inferior a ambas.

Os resultados finais de elevações adiabáticas também não estavam de acordo com o esperado, de que quanto maior a temperatura inicial maior seria a elevação (mesmo que com pouca diferença). O resultado mostrou exatamente o oposto, quanto menor a temperatura, maior a elevação final.

Por último, observando o trecho inicial em maior amplitude na Figura 57, percebe-se que os formatos que as curvas nas primeiras horas possuíam eram diferentes entre si. Se assemelhando no fato de apresentarem inicialmente um aumento expressivo de temperatura, seguido de um momento de uma pequena pausa e finalmente um aumento mais suave de temperatura.

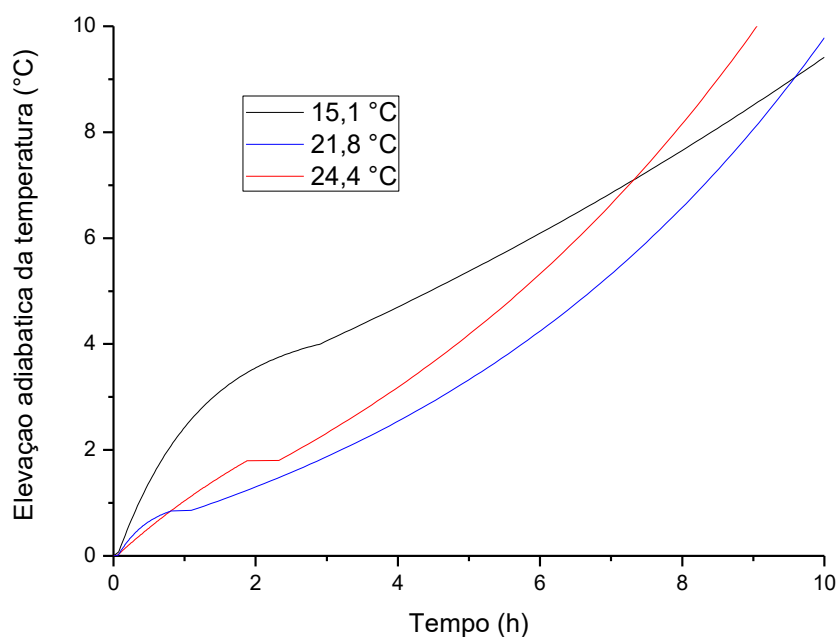


Figura 57 - Elevação adiabática em diferentes temperaturas iniciais nas primeiras horas

O estudo das características da reação de hidratação do concreto e de princípios da físico-química forneceram explicações para essa disparidade entre os formatos das curvas nas primeiras horas e a diferença entre o esperado para curvas em diferentes temperaturas iniciais.

Diversos autores (SCRIVENER et al., 2015; SCRIVENER, NOMAT, 2011; BULLARD et al., 2011) mostraram em seus estudos que em um primeiro momento com a mistura da água com cimento ocorre um grande pico de liberação de calor devido a dissolução dos grãos. Posteriormente ocorre um período de dormência em que a reação ocorre de forma desacelerada, seguido de uma aceleração da reação chamada de período de indução.

A Figura 58 que mostra a calorimetria isotérmica ($T_i = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) de uma pasta de cimento utilizado na mesma proporção água cimento corrobora com essa característica apontada anteriormente. A escala logarítmica visa ressaltar o elevado fluxo de calor que ocorre na primeira hora da mistura devido à energia de dissociação das partículas de cimento.

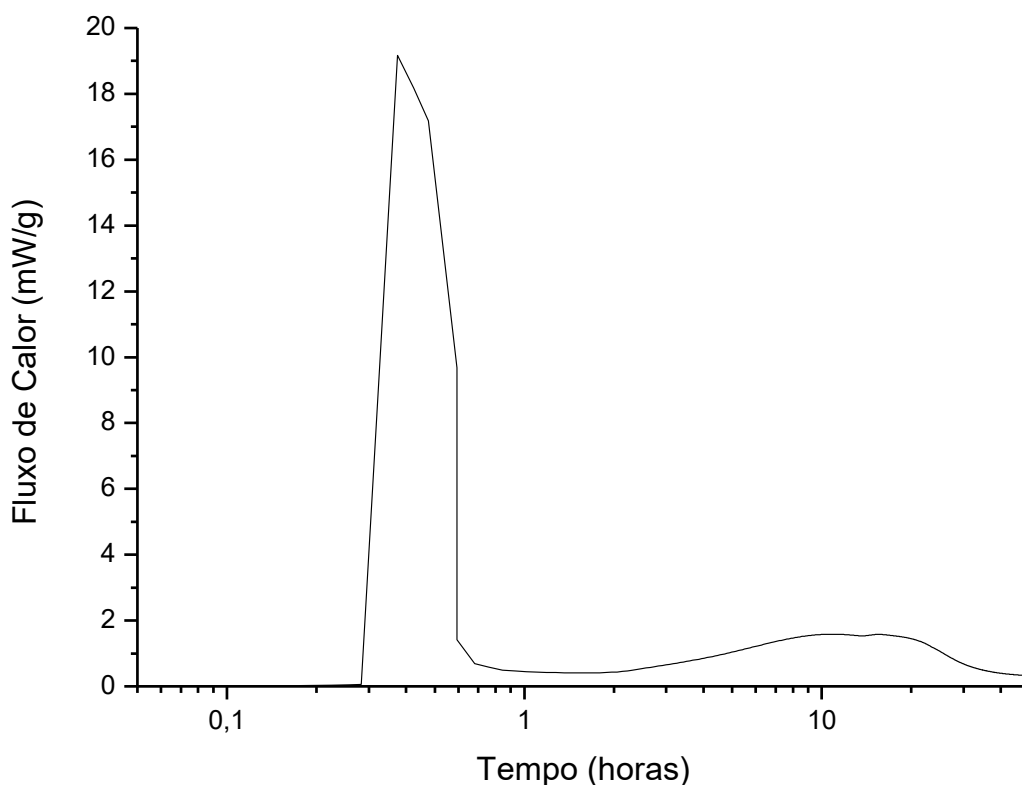


Figura 58 - Calorimetria isotérmica $T_i = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Em relação a características das reações químicas em geral, explicadas pela físico química, leva-se em conta dois pontos. Primeiro, que todos os processos químicos exotérmicos que utilizam a mesma quantidade de materiais possuem liberação igual de energia, seja por dissolução, seja por hidratação. Isto é, as energias liberadas de dissolução das partículas de cimento na água serão iguais entre si, independentes da temperatura inicial, o mesmo ocorre com a energia liberada pela hidratação dessas partículas. Segundo, as reações tanto de dissolução quanto de hidratação são aceleradas pelo aumento de temperatura e retardadas com a sua diminuição.

Juntando todos esses pressupostos teóricos, supôs-se que devido à demora de cerca de 10 minutos entre a mistura da água com o cimento e o começo da aquisição de dados da calorimetria adiabática, em temperaturas iniciais altas não foi possível adquirir a maioria dos dados referentes a dissolução dos grãos de cimentos devido à alta velocidade desse processo. Em temperaturas mais baixas, e consequentemente com menor velocidade dos processos, a captação de dados calorimétricos foi mais completa.

A mudança da tendência da curva nas primeiras horas, marcada pela pequena pausa no aumento das temperaturas citadas anteriormente, representaria o período de dormência. Já o aumento posterior da temperatura indicaria o início do dito período de indução da reação da hidratação do cimento.

Considerando essas explicações para as diferenças entre as curvas adiabáticas, os dados referentes ao grau de hidratação do concreto (baseados nessas curvas) no momento da realização dos ensaios mecânicos seriam imprecisos por considerar o calor de dissolução como de hidratação. Dependendo da temperatura inicial esse erro poderia ser maior ou menor.

A solução encontrada para esse problema consistiu em, assim como é feito com calorimetrias isotérmicas, corrigir a curva, eliminando a parte referente ao calor de dissolução das partículas de cimento. A correção foi feita de forma empírica, observando o período da curva em que ocorre mudança de forma. Exemplos do ponto escolhido para a correção podem ser observados na Figura 59.

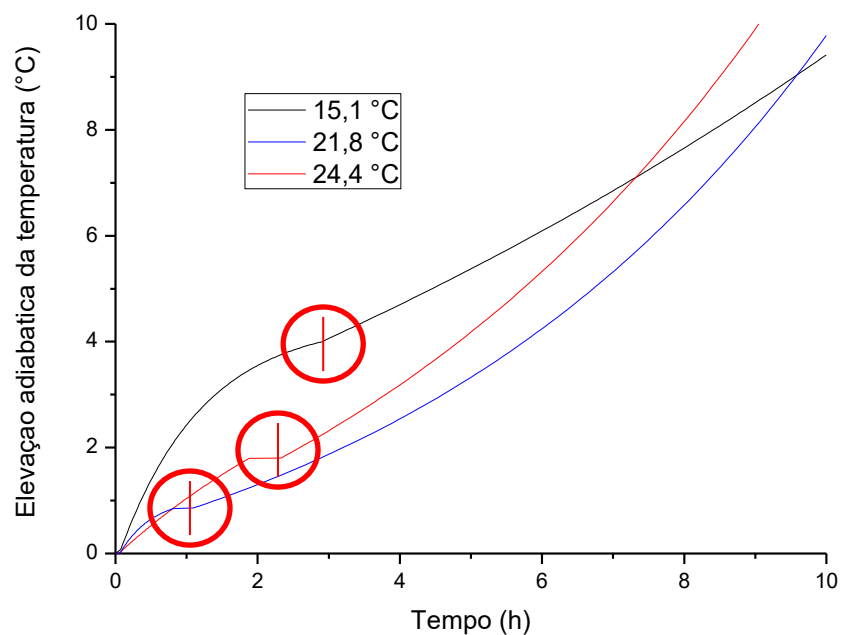


Figura 59 – Pontos de correção das curvas de elevação adiabática

Visualmente (Figura 60 e Figura 61) as correções feitas nas curvas foram eficazes, de modo que elas assumiram o formato e o resultado esperado, quanto maior a temperatura mais rápida a reação de hidratação. No que se refere a elevação final de temperatura, observa-se uma diminuição significativa na curva de menor temperatura, já a de maior temperatura se aproxima mais das outras não sendo mais a menor.

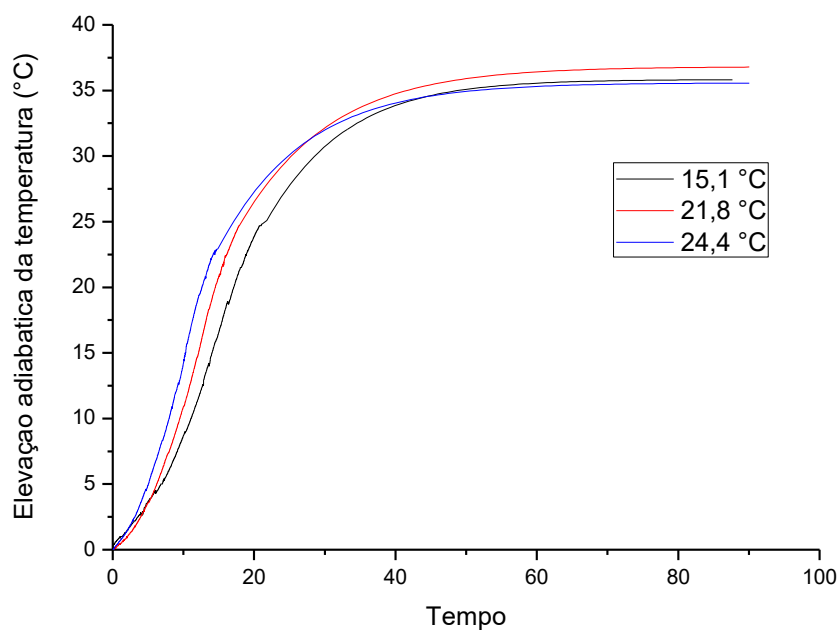


Figura 60 - Elevações adiabáticas corrigidas (escala linear)

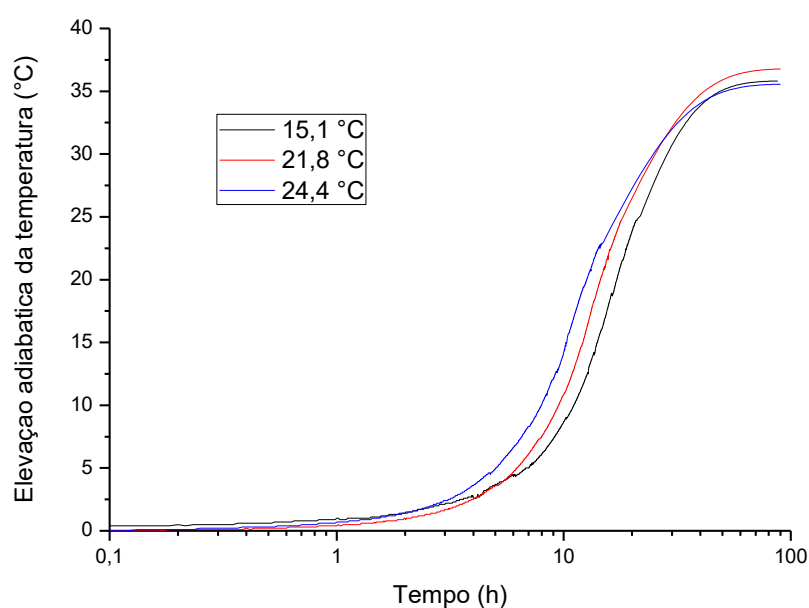


Figura 61 - Elevações adiabáticas corrigidas (escala logarítmica)

Para fundamentar melhor os efeitos da mudança foram comparados os principais indicadores estatísticos de variabilidades dos resultados da elevação adiabática final de diversas calorimetrias. As estatísticas mostraram que a correção proporcionou resultados mais coesos e menos variáveis entre si, corroborando com a solução fornecida anteriormente. As análises estatísticas feitas podem ser observadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros estatísticos das elevações adiabáticas com e sem correção

Indicador estatístico	Elevações adiabáticas não-corrigidas	Elevações adiabáticas corrigidas	Redução (%)
Média (°C)	37,97	36,04	5,08%
Desvio padrão (°C)	1,53	0,90	41,04%
Variância	2,33	0,81	65,24%
Coeficiente de variação	4,02	2,50	37,89%

Fazendo agora a mesma comparação entre curvas calorimétricas da Figura 54 com as duas curvas tendo sido corrigidas pelo método apresentado anteriormente, é visível pelo valor de R^2 e pelo erro mostrados no quadro do gráfico (Figura 62) que ela está mais próxima do ideal, em relação ao gráfico anterior (Figura 54).

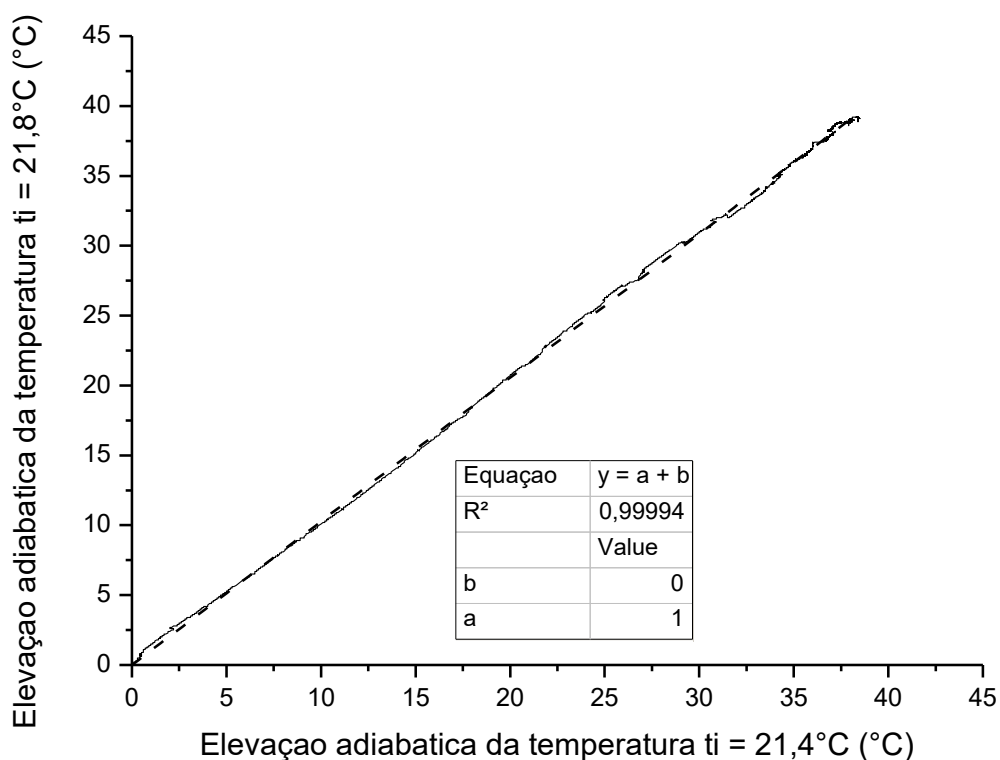


Figura 62 - Comparativo entre curvas adiabáticas de diferentes temperaturas iniciais corrigidas

Considerou-se assim a correção da curva adiabática como acertada e a partir disso, procurou-se estabelecer um paralelo entre a temperatura inicial da calorimetria com a correção feita no gráfico. O resultado está presente na Figura 63 e apesar de não apontar alguma explicação matemática exata para isso, percebe-se uma tendência de aumento da correção com a diminuição da temperatura inicial, observada nas áreas circuladas.

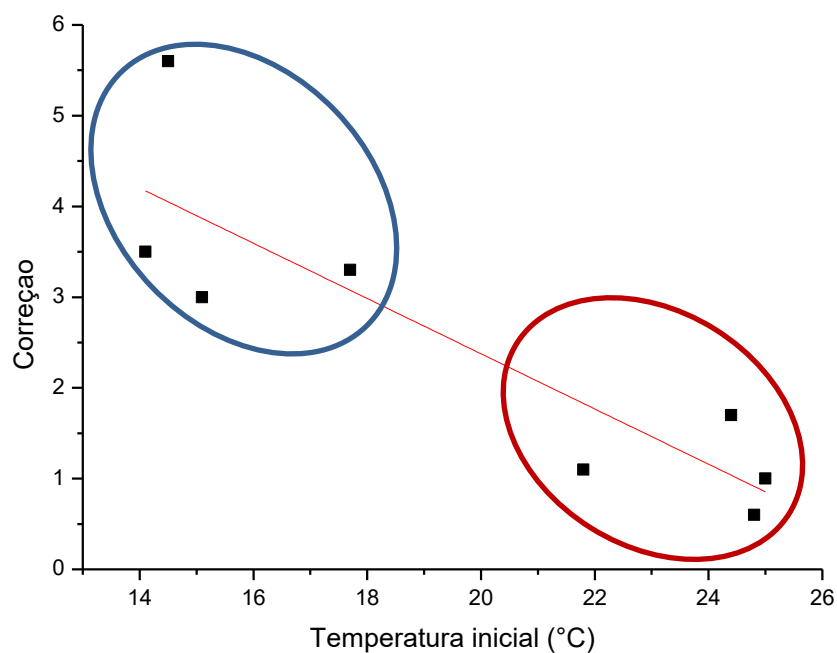


Figura 63 - Relação entre a temperatura inicial e temperatura corrigida na calorimetria adiabática

A partir dessa análise considerou-se que todas as calorimetrias adiabáticas deveriam ser corrigidas antes do cálculo de hidratação. Modificando assim a Equação 13 e gerando uma nova equação de cálculo de grau de hidratação, em que T_c seria a temperatura de correção da curva adiabática.

$$\xi(t) = \frac{T(t) - T_c}{T(t=\infty) - T_c} \quad \text{Equação 39}$$

5.2 Ensaio de compressão axial

Serão apresentados os resultados extraídos dos ensaios mecânicos de compressão axial e sua respectiva análise.

5.2.1 Hidratação completa

A Tabela 18 mostra a relação entre os resultados de compressão axial do concreto referente a dosagem já apresentados no Capítulo 3 do trabalho com os obtidos

com concreto completamente hidratado que teve sua cura no tanque de água ligada ao calorímetro adiabático.

Tabela 18 - Parâmetros estatísticos dos resultados de compressão máxima do concreto

Indicador estatístico	Cura úmida	Cura no tanque de água
Média (°C)	41,16	34,40
Desvio padrão (°C)	1,77	1,73
Variância	3,12	2,98
Coeficiente de variação	7,57	8,66

É visível a queda de resistência ocorrida entre os dois tipos de cura na ordem de 16,4%. Levantou-se então duas hipóteses possíveis baseadas na forma como é feita a cura no tanque de água ligados ao calorímetro. A primeira hipótese é relativa à alteração do fator água cimento devido a imersão dos corpos de prova na câmara de cura, a segunda devido as altas temperaturas de cura.

A mudança do fator água cimento seria responsável pelo aumento da porosidade do concreto, que por sua vez aumentada reduziria a capacidade de resistência do concreto a compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2006; POPOVICS; UJHELYI, 2008). No entanto, essa hipótese foi desconsiderada devido à utilização do MEC na dosagem do concreto, que garante a menor quantidade de vazios possíveis, impossibilitando a entrada de água em quantidade suficiente para afetar a resistência da mistura.

A segunda hipótese parece mais plausível, a literatura mostra que um concreto curado em altas temperaturas tem a sua resistência afetada devido a forma como ocorre a hidratação (SHOUKRY et al., 2011; TAN; GJORV, 1996)

As calorimetrias adiabáticas alcançavam o valor de até 65 °C, valor suficientemente alto para alterar as propriedades mecânicas do concreto. Considera-se assim que a variação na resistência à compressão devido a mudança na forma da cura dos corpos de prova ocorreu devido à alta temperatura da câmara ligada ao calorímetro adiabático.

5.2.2 Resistência à compressão x Hidratação

A necessidade de correção das curvas de calorimetria adiabática demonstrada no item 5.1 exigiu modificações no programa experimental de ensaios mecânicos. As faixas de hidratação mostradas no capítulo anterior não foram utilizadas, devido às correções que alteraram os valores de hidratação de ensaios já ocorridos. Apesar das modificações, não houve perdas para o andamento dos trabalhos ou para os resultados experimentais.

A Figura 64 mostra a relação entre o grau de hidratação e a resistência à compressão relativa do concreto. A linha de tendência utilizada pelo *software OriginPro 8* na forma de um polinômio de segundo grau ($y = 1,25716x^2 - 0,30454x + 0,04285$).

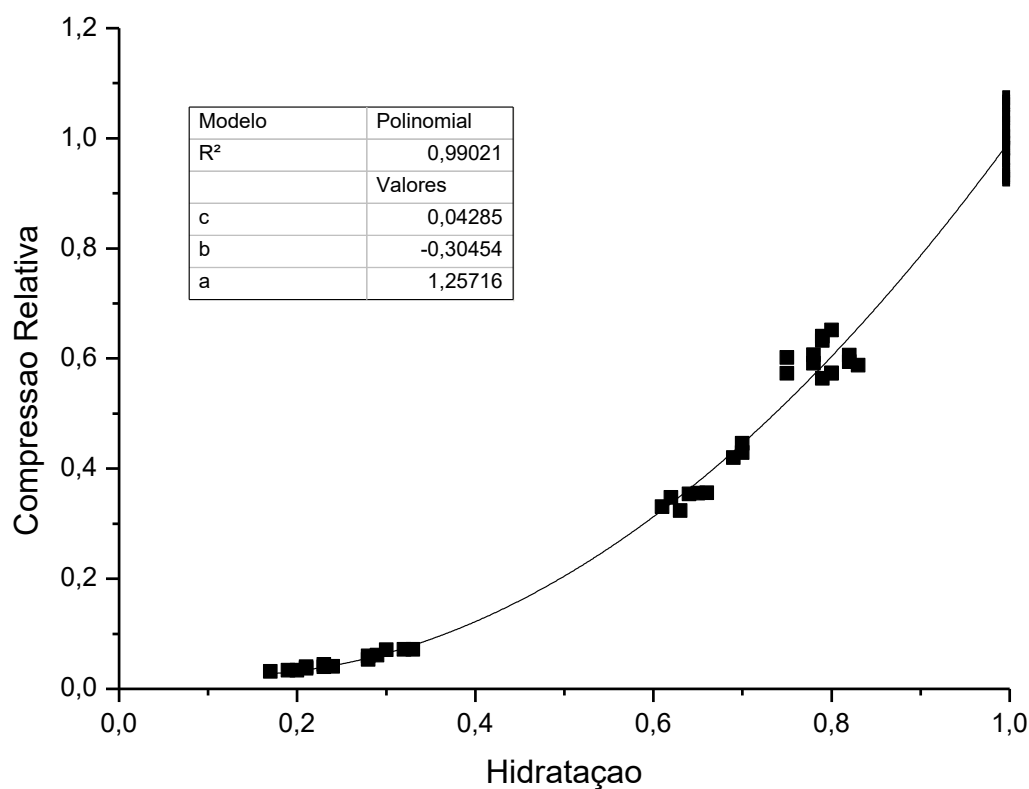


Figura 64 - Relação entre grau de hidratação e resistência à compressão relativa

O valor de R² próximo de 1, mostra que os valores experimentais são concisos obedecendo a uma lei matemática que explica o aumento de resistência com o aumento da hidratação e que a curva de tendência representa com precisão esse fenômeno.

Segundo a equação mostrada, o menor valor de resistência relativa seria de 0,0244 alcançada com uma hidratação de 12,11 %. Esse resultado não é estranho à teoria físico-química-mecânica que rege o concreto, e pode indicar o início do patamar de percolação.

Como mencionado no Capítulo 2, o patamar de percolação indica a transição de fases do concreto, de dispersão coloidal a sólido. Assim, o menor valor possível para resistência do concreto a partir da curva de tendência gerada através de resultados experimentais indicaria o ponto em que o corpo se torna sólido, ou seja, adquire uma resistência. O patamar de percolação será novamente analisado juntamente com a evolução do módulo de elasticidade em relação ao grau de hidratação.

A análise da heterogeneidade dos resultados mostrados na Figura 64, e todos os próximos feitos, foi feita de duas maneiras diferentes: dispersão dos resultados em relação a curva de tendência estabelecida e dispersão dos resultados entre si. Para essas análises foi utilizada uma curva normalizada pela média dos corpos completamente hidratados. A partir disso os resultados foram divididos em cluster para que a análise de dispersão possa ser feita por grupos de resultados relativamente homogêneos. Esses clusters podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 - Divisão de clusters de compressão

Número do cluster	Variação de hidratação (%)	Número de amostras	Hidratação média (%)	Compressão relativa média
1	100	18	100,00%	1,00
2	74-84	13	80,11%	0,60
3	61-71	9	65,58%	0,37
4	27-33	6	29,83%	0,06
5	17-25	8	21,01%	0,04

Assim como o proposto anteriormente divisão de cluster foi feita de modo a não exceder 10% de variação no grau de hidratação para não haver confusão de dados ou erros na análise estatística. Os resultados, pela proximidade do grau de hidratação dentro de um

cluster, foram consideráveis comparáveis entre si, apesar de pequenas diferenças no grau de hidratação. Em alguns casos resultados dentro dos clusters foram eliminados utilizando o teste Q que elimina resultados que estão destoantes do resto do cluster.

O método de análise da dispersão dos resultados em relação a curva de tendência foi o desvio quadrático médio dos resultados experimentais. Utilizando-se esse parâmetro em um gráfico em relação a hidratação do concreto, obtém-se uma curva de tendência potencial ($y = 0,0494x^{2,1489}$) com o R^2 de 0,9757, observada na Figura 65.

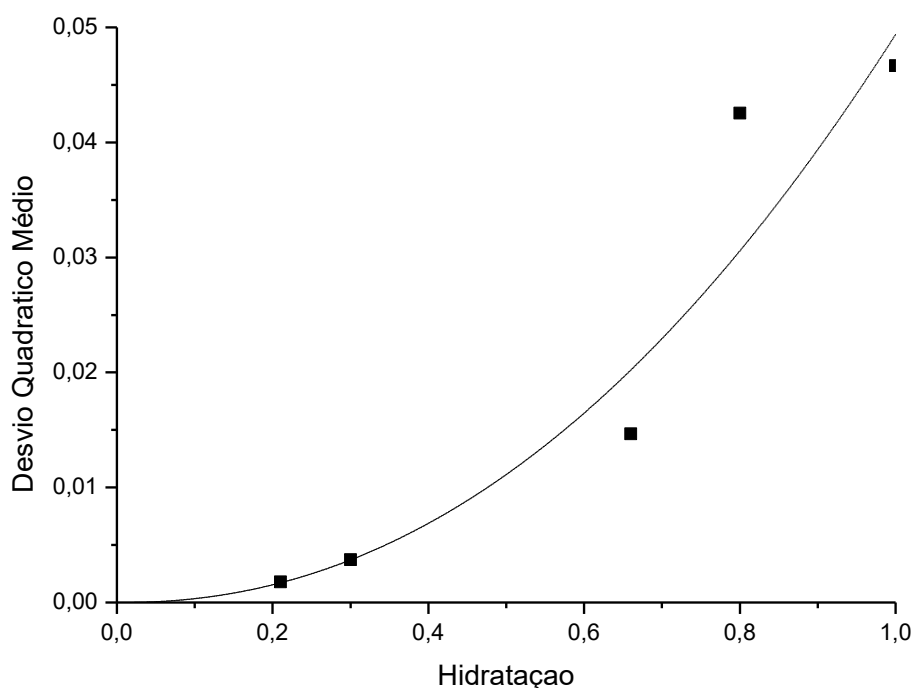


Figura 65 - Relação entre desvio quadrático médio da resistência à compressão com grau de hidratação médio dos clusters

O resultado mostra o que é visualmente evidente na Figura 64, quando maior o grau de hidratação do concreto, mais os resultados parecem desviar da linha de tendência que foi traçada. A diferença de grandeza entre o cluster de menor e maior hidratação chega a ser de 25 vezes.

Esse tipo de análise pode gerar também algumas interpretações erradas, indicadores estatísticos absolutos sozinhos mostram-se um tanto ineficientes para a comparação de grupos cujas grandezas dão diferentes. A compressão relativa média do cluster de maior hidratação é de 1,00 enquanto do de menor hidratação é 0,04. A solução

seria criar um indicador estatístico relativo, ou seja, dividir o desvio quadrático médio pela compressão relativa do seu respectivo cluster.

Utilizando-se os resultados obtidos através da curva potencial mostrada na Figura 65 dividindo-os pelos pontos fornecidos pela curva polinomial de segundo grau da Figura 64, obtém-se uma curva de desvio quadrático relativo mostrada na Figura 66.

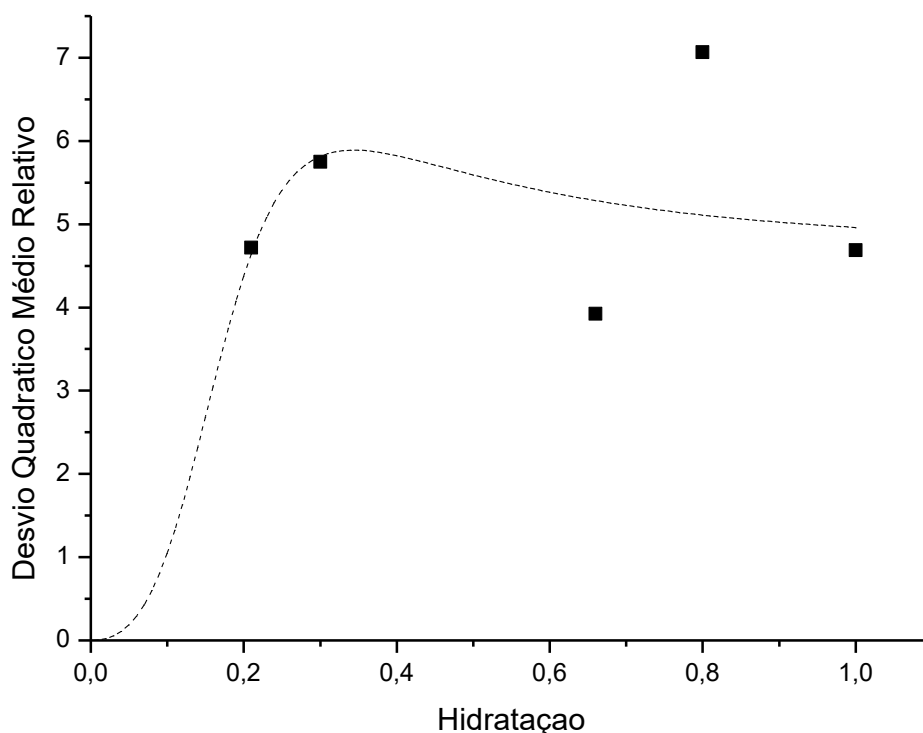


Figura 66 – Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo da resistência à compressão com grau de hidratação médio

O que essa curva mostra é um aumento do desvio médio quadrático de forma exponencial até os 34%, quando alcança 5,9% de desvio, seguido de uma leve diminuição até o final da reação de hidratação, mantando-se relativamente estável, alcançando no final 5% de desvio.

Os primeiros momentos da curva, em que ela é crescente, é também o momento de maior instabilidade física do concreto, nos primeiros momentos, ele é uma suspensão do grão de cimento na água e aos poucos esse grão hidrata até formar um esqueleto poroso. Assim, considera-se a hipótese de que o pico da curva é o momento em que o

concreto começa a se estabilizar enquanto sólido, após esse pico a estabilização aumenta com a redução gradual da dispersão até alcançar valor mínimo.

Para a comparação dos resultados de hidratação entre si, serão utilizados os indicadores estatísticos mais básicos e utilizados na modelagem proposta por Tailhan; Pont & Rossi (2010): média e desvio padrão e também variância e coeficiente de variação. O resultado dos cálculos de dispersão da resistência a compressão dentro de um cluster são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Parâmetros estatísticos da resistência a compressão relativa nos clusters

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Compressão relativa média	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
1	1,00	1,00	0,0480	2,31E-03	4,82
2	0,80	0,60	0,0289	7,58E-04	4,80
3	0,66	0,37	0,0454	2,06E-03	12,16
4	0,30	0,06	0,0078	6,14E-05	12,09
5	0,21	0,04	0,0043	1,86E-05	11,45

Atendo-se principalmente ao coeficiente de variação, um indicador estatístico relativo, a indicação é que os resultados entre si são mais concisos nos graus mais altos de hidratação (clusters 1 e 2) e maior em graus menores (clusters 3, 4 e 5), porém sem mostrar nenhuma tendência.

Novamente, esses dados podem conter imprecisões devido ao simplismo. Uma breve análise do coeficiente de variação dos graus de hidratação entro dos cluster mostra que quando menor a hidratação, maior a dispersão dos resultados (Tabela 21). Esse fenômeno ocorre devido a dois fatores, ensaios mecânicos de compressão feitos com baixa hidratação demoram mais devido a plasticidade do concreto e nos primeiros momentos da calorimetria adiabática a velocidade de aumento da temperatura é maior (ver Figura 60).

Tabela 21 - Parâmetros estatísticos de variação do grau hidratação nos clusters

Número do cluster	Desvio Padrão	Variância	Coeficiente de variação
1	0,0000	2,31E-03	0,00
2	0,0167	2,80E-04	2,09
3	0,0326	1,06E-03	4,97
4	0,0204	4,16E-04	6,84
5	0,0248	6,15E-04	11,80

O aumento da dispersão dos valores de grau de hidratação com a diminuição dessa grandeza pode gerar resultados mal interpretados, novamente uma solução é adotada para esse problema, os resultados de compressão relativa foram deslocados de sua hidratação original para a hidratação média do cluster utilizando-se a curva de tendência. Para isso calculou-se a diferença entre a hidratação do ensaio e a hidratação média, ambos a partir da curva de tendência, e essa diferença foi somada ao valor real de resistência relativa do ensaio, simulando um deslocamento. O resultado do ajuste pode ser observado na Figura 67.

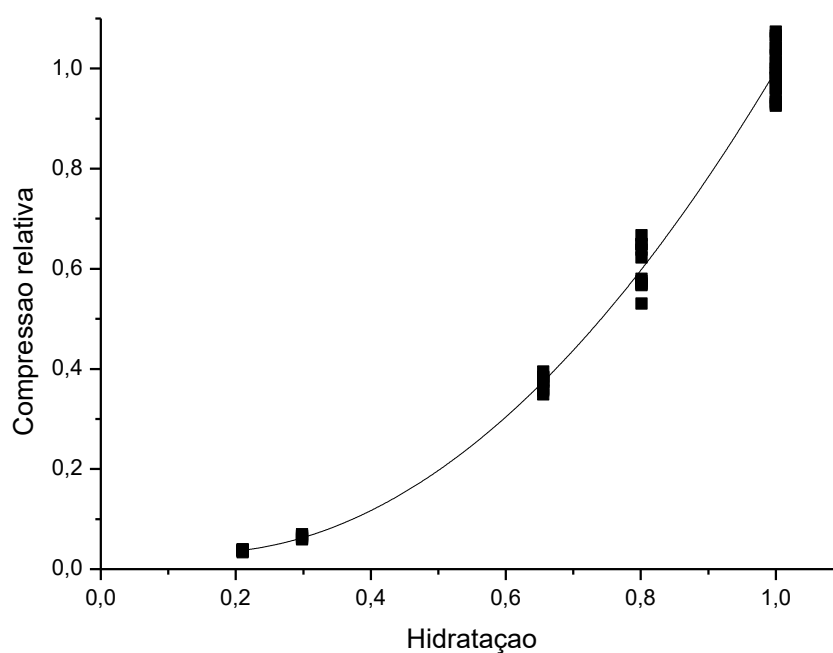


Figura 67 - Relação hidratação e resistência à compressão relativa corrigida

A análise desse resultado já corrigido mostra que média, desvio padrão e variância tem resultados que formam curva de tendência com R^2 superior a 0,97, significando que os dados são coerentes entre si. Os resultados numéricos obtidos nessa análise são encontrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros estatísticos da resistência a compressão relativa corrigida dentro dos clusters

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Compressão relativa média	Desvio Padrão	Variância
1	1,00	1,00	0,048	2,31E-03
2	0,80	0,60	0,045	1,99E-03
3	0,66	0,37	0,015	2,15E-04
4	0,30	0,06	0,004	1,51E-05
5	0,21	0,04	0,002	3,52E-06

Novamente serão utilizados os valores obtidos com as curvas de tendência da média e do desvio padrão para traçar a relação entre coeficiente de variação e hidratação. A curva do desvio padrão (Figura 69) é uma curva de potencial ($y = 0,0506x^{2,1335}$) e a da média (Figura 68) é um polinômio de segundo grau ($y = 1,3295x^2 - 0,395x + 0,0622$). O resultado é a curva apresentada na Figura 70.

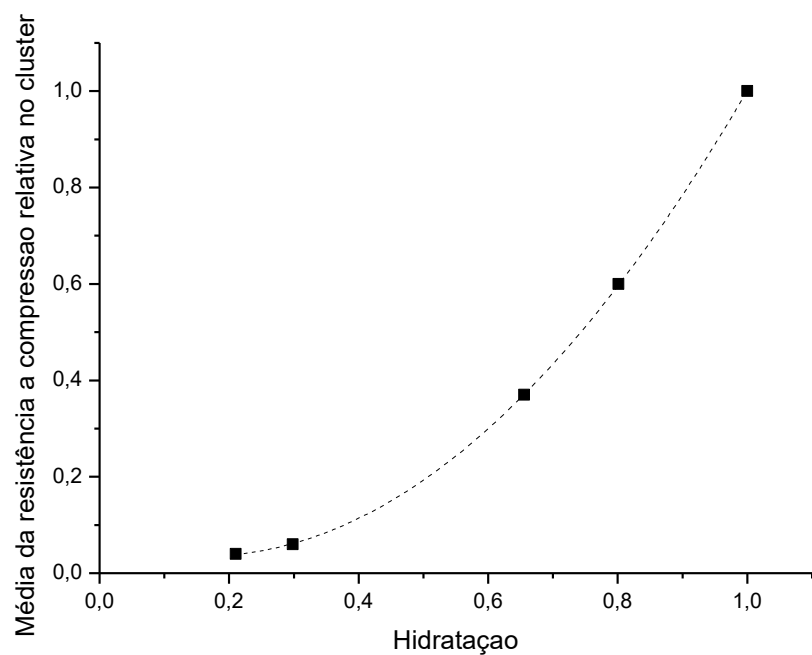


Figura 68 - Relação entre a hidratação e média da compressão relativa nos clusters

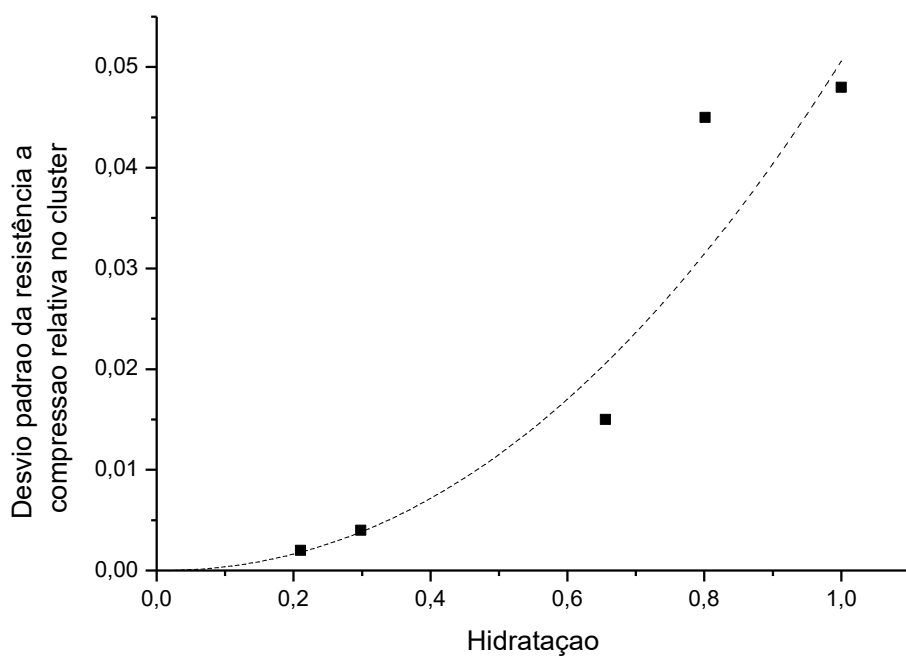


Figura 69 - Relação entre a hidratação e o desvio padrão da compressão relativa nos clusters

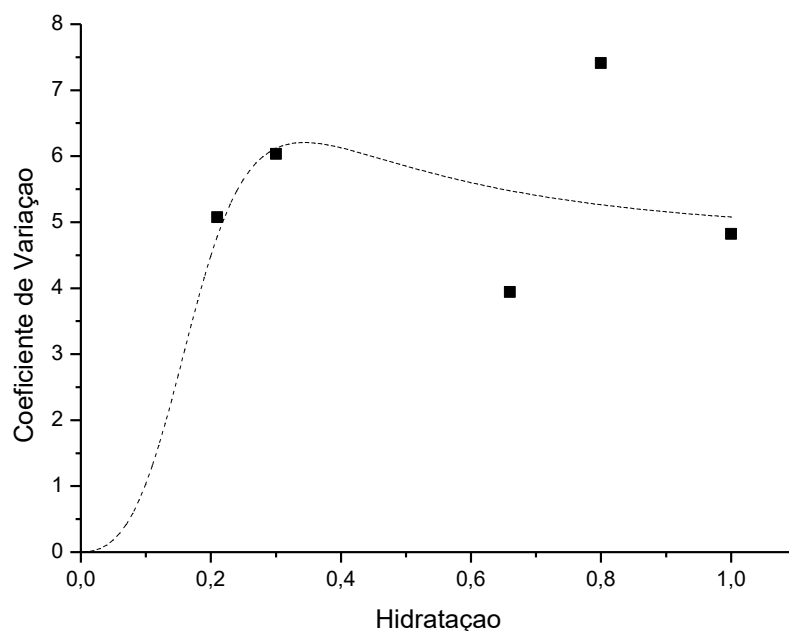


Figura 70 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação dentro dos clusters

A curva de coeficiente de variação em função da hidratação é extremamente semelhante à mostrada anteriormente do desvio quadrático médio relativo. Até os 20% de hidratação elas são iguais, sendo então a curva do coeficiente de variação um pouco maior que a outra até o final. Essa segunda análise, corrobora com a hipótese feita anteriormente que relaciona heterogeneidade de resultados mecânicos com predominância de estados físicos no concreto.

5.2.3 Deformação de pico x Hidratação

Um parâmetro pouco convencional, mas que permite avaliar as características do material em diversos graus diferentes é a deformação de pico, ou seja, a deformação que ocorre no concreto no momento de maior resistência do corpo de prova.

A Figura 71 mostra que a relação entre hidratação e deformação de pico é mais dispersa que entre hidratação em resistência a compressão. O valor do R^2 de 0,90058 corrobora com essa deformação que pode ser explicada pelo aumento da plasticidade do concreto com a diminuição do grau de hidratação.

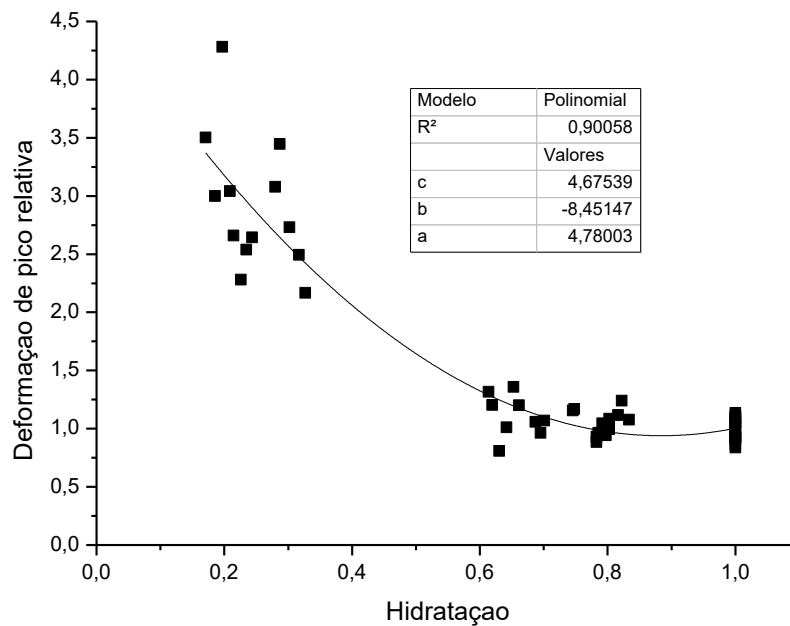


Figura 71 - Relação entre grau de hidratação e deformação de pico

O concreto atinge o patamar de percolação com a formação de um esqueleto de hidratos formado a partir da hidratação dos grãos de clínquer, esse evolui com o aumento dessa reação (FAIRBAIRN, 2010). Os hidratos em um concreto completamente hidratado geram uma ruptura frágil ao corpo de prova quando sujeito à compressão.

Apesar disso, em baixas idades, ainda há no concreto a dispersão composta por água e cimento que ainda não reagiram entre si, trazendo características plásticas para o concreto. A Figura 71 reitera essa ideia mostrando valores visivelmente mais altos de deformação de pico para baixa hidratação, sendo em média três vezes maiores aos de hidratação completa.

A exemplificação visual das diferentes plasticidades do concreto conforme o grau de hidratação podem ser observadas na Figura 72, onde pode ser visto a curva de tensão-deformação para diferentes clusters. O aumento da hidratação interfere também na deformação de pico, que reduz de acordo com o aumento do grau.

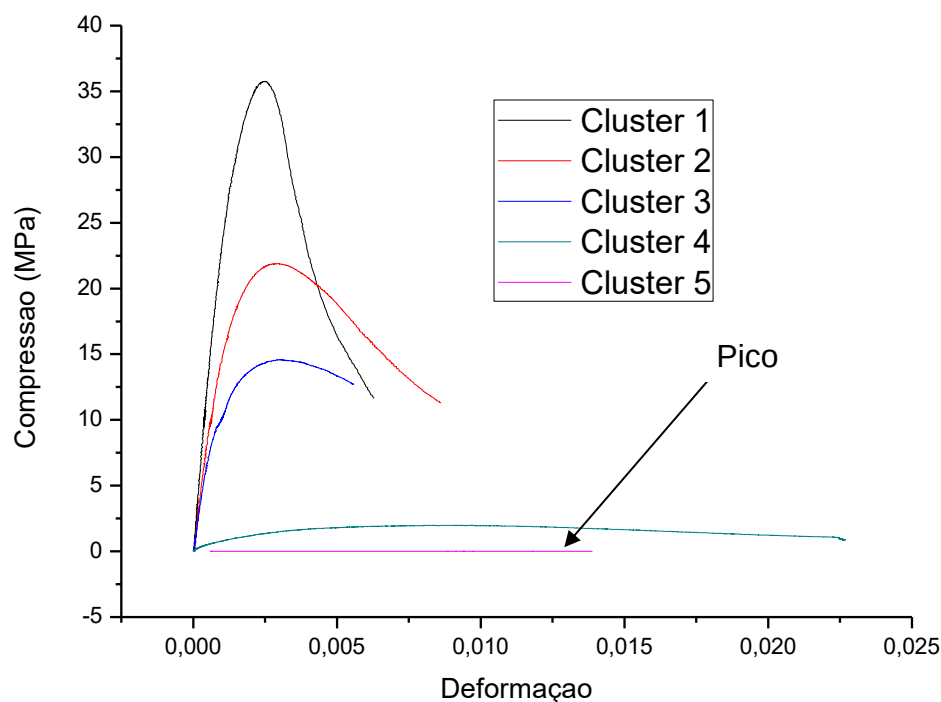


Figura 72 - Curva tensão deformação de espécimes de diferentes clusters

O método e parâmetros estatísticos serão os mesmos utilizados anteriormente para compressão do concreto, utilizando-se inclusive os mesmos clusters. O resultados das análises podem ser observados através dos parâmetros estatísticos mostrados na Tabela 23 e Tabela 24, que mostram respectivamente resultados para dispersão em relação a curva de tendência e dispersão dos resultados entre si.

Tabela 23 - Parâmetros estatísticos da dispersão da deformação relativa em relação a linha de tendência

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Deformação relativa média	Desvio quadrático médio
1	1,00	1,00	0,087
2	0,80	1,04	0,121
3	0,66	1,11	0,181
4	0,30	2,78	0,424
5	0,21	2,99	0,528

O resultado dos parâmetros de dispersão em relação a linha de tendência mostra um aumento claro da heterogeneidade dos resultados com a diminuição da hidratação. Novamente, através desvio quadrático médio calculado nos pontos médios dos clusters permite gerar uma curva polinomial de segundo grau ($y = 0,6515x^2 - 1,3412x + 0,7764$) com um $R^2 = 0,9995$, ou seja, completamente representativa do desvio em relação a curva de tendência. Utilizando essa curva e a de tendência mostrada na Figura 71, gera-se uma terceira do desvio médio quadrático relativo.

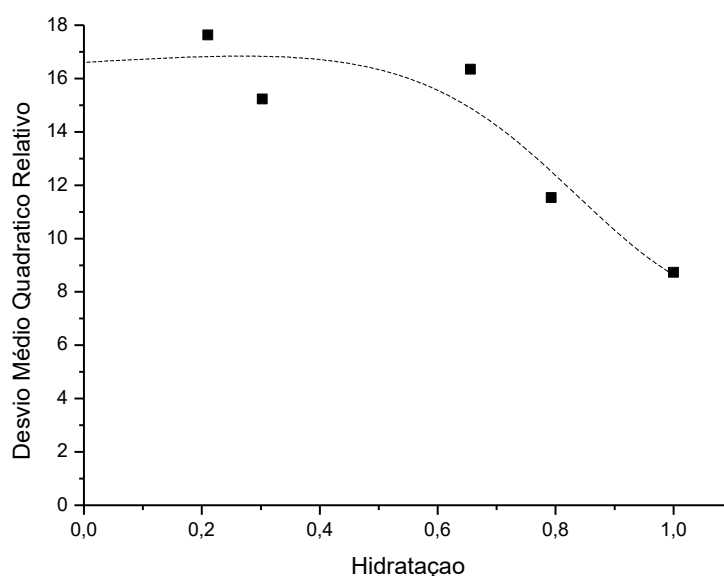


Figura 73 - – Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo da deformação de pico com grau de hidratação médio

O resultado final é uma alta variação na deformação de pico que se reduz juntamente com a hidratação do concreto chegando ao valor mínimo, metade do valor máximo, na hidratação completa do material. A diminuição da plasticidade do concreto gera diminuição da dispersão da deformação de pico.

Para análise estatística dos clusters entre si, novamente foi feita a correção aplicada na análise da resistência à compressão em que se utiliza a hidratação média como referência (Figura 74). Os parâmetros estatísticos de deformação de pico, mostrados na Tabela 24, também seguem a tendência de uma curva polinomial de segundo grau, sendo a média e o desvio padrão com R^2 superior a 0,98. Essas duas curvas foram utilizadas para traçar uma terceira representativa do coeficiente de variação dentro dos clusters.

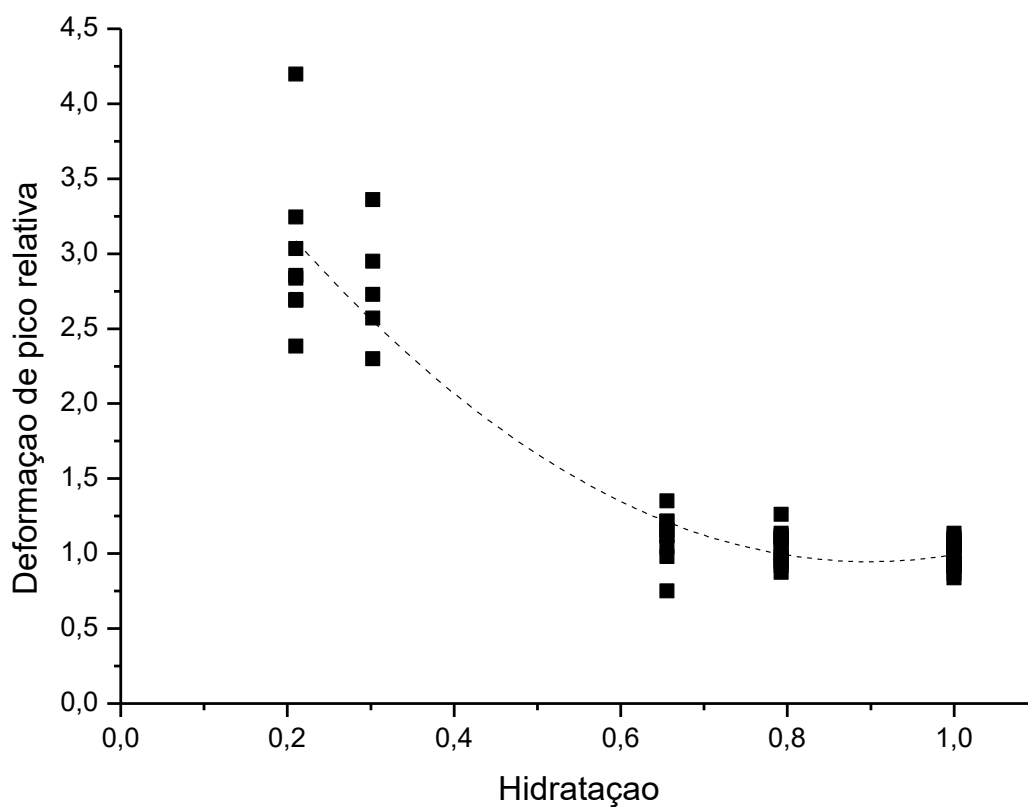


Figura 74 - Relação entre grau de hidratação e deformação de pico relativa corrigida

Tabela 24 - Parâmetros estatísticos da deformação corrigida pela hidratação nos clusters

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Média	Desvio Padrão	Variância
1	1,00	0,99	0,088	0,008
2	0,80	1,04	0,107	0,012
3	0,66	1,11	0,171	0,029
4	0,30	2,78	0,401	0,161
5	0,21	2,99	0,549	0,302

É possível também ver os gráficos e suas respectivas tendências da média (Figura 75), desvio padrão (Figura 76) e coeficiente de variação em relação a hidratação (Figura 77.).

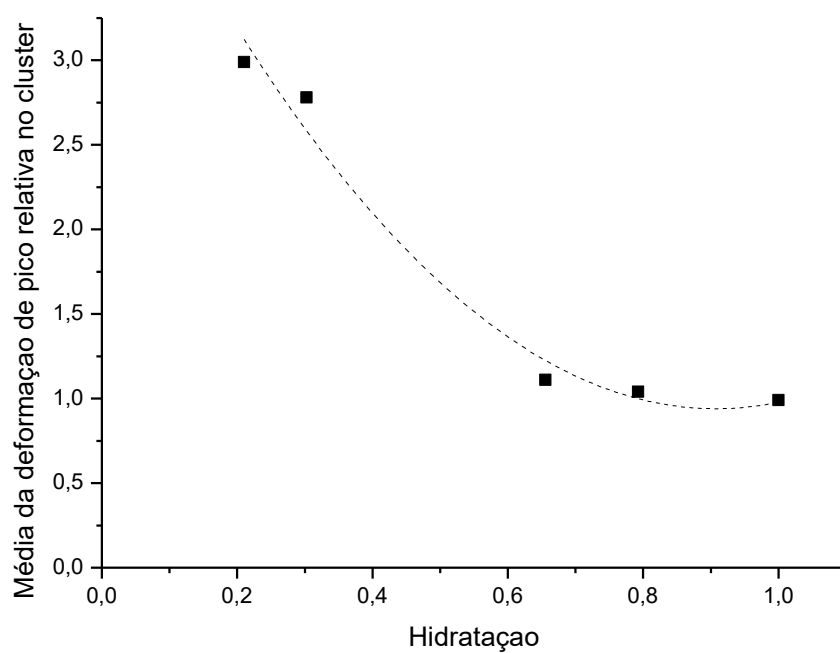


Figura 75 - Relação entre hidratação e média da deformação de pico relativa no cluster

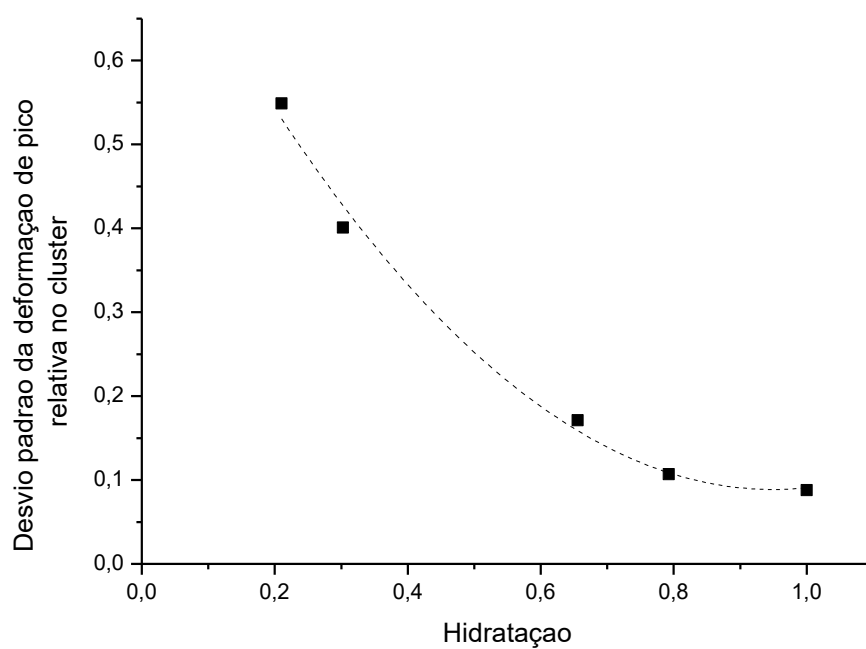


Figura 76 - Relação entre hidratação e desvio padrão da deformação de pico relativa no cluster

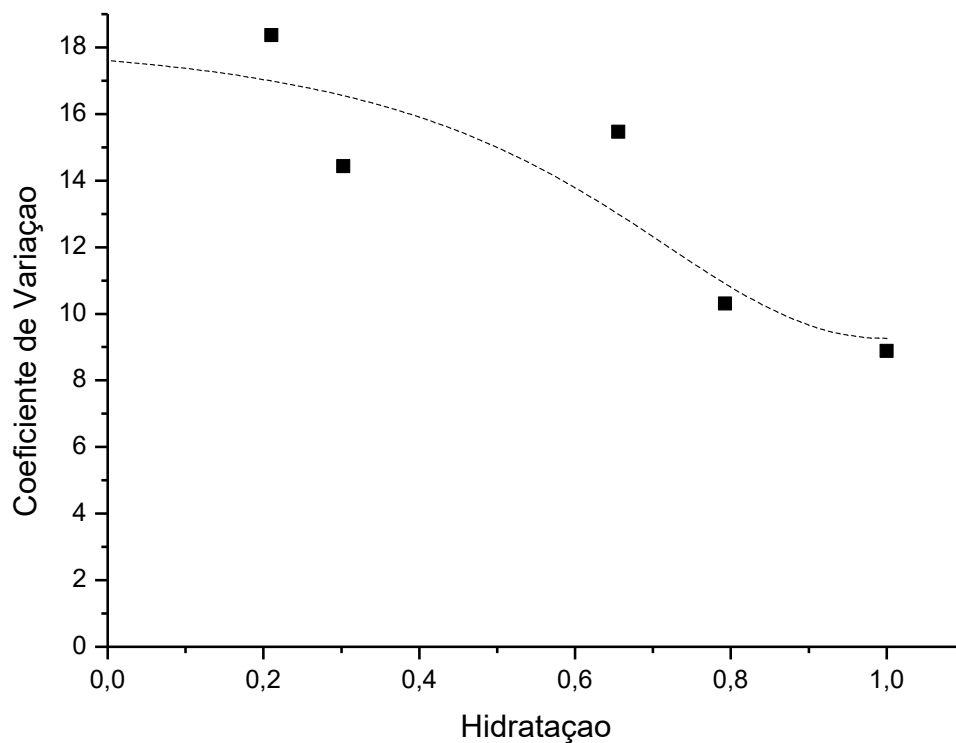


Figura 77 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação da deformação de pico dentro dos clusters

Nos dois tipos de análise observa-se a tendência semelhante do aumento da dispersão dos resultados com a redução do grau de hidratação e aumento da plasticidade do material. Mesmo com diferenças em relação a grandeza dos observa-se que a tendência de variabilidade é a mesma.

5.2.4 Módulo de elasticidade x Hidratação

O módulo de elasticidade de cada uma das amostras foi obtido a partir do gráfico de tensão-deformação, onde é observado o trecho inicial linear e a partir dele é calculada essa grandeza.

A curva de tendência gerada a partir dos resultados experimentais para módulo de elasticidade mostrou-se bem representativa, com um R^2 de 0,97559, como pode ser observado na Figura 78. Percebe-se que curva de tendência com a concavidade no sentido oposto em relação a curva hidratação-resistência a compressão.

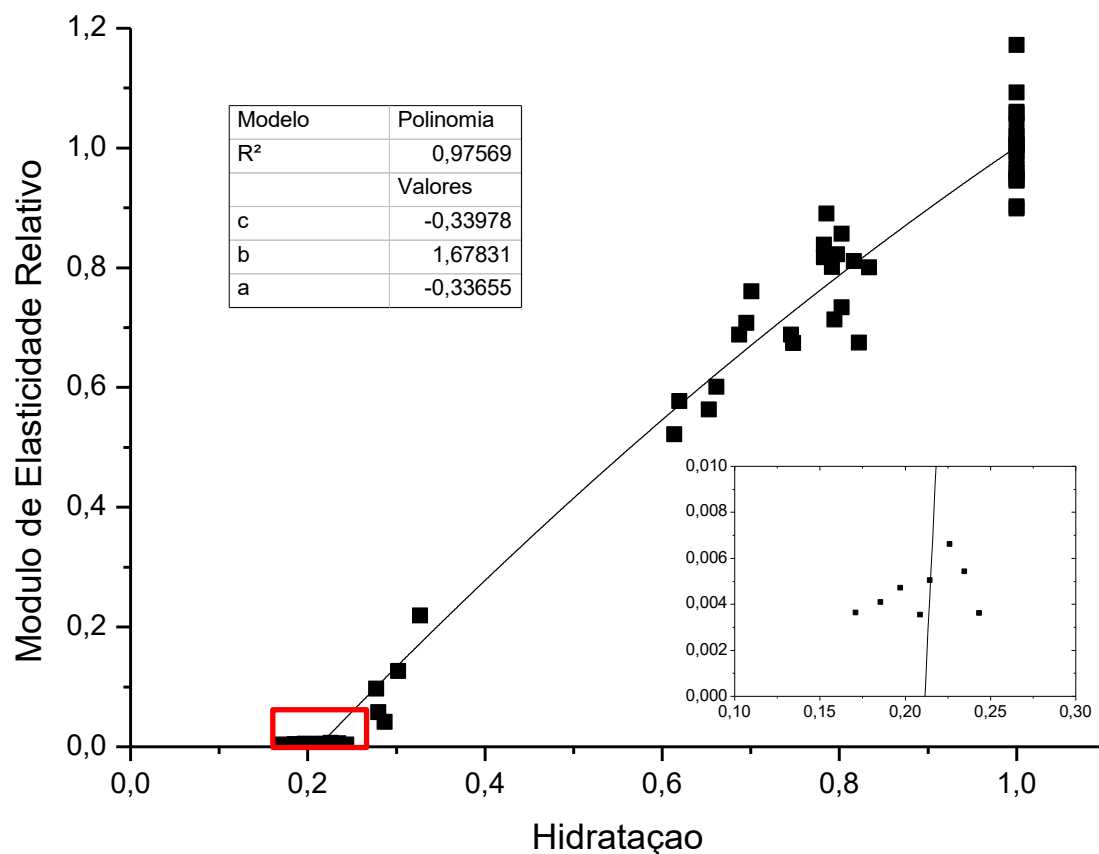


Figura 78 - Relação entre grau de hidratação e módulo de elasticidade relativo

A curva de tendência indica que em torno dos 21 % de hidratação o corpo teria um módulo de elasticidade nulo, contrastando com os 12,11 % de menor resistência do material obtido através da compressão. Apesar desse primeiro valor, um dos ensaios foi realizado com êxito aos 17,10 % de hidratação e atingiu um valor de 0,08 GPa de módulo de elasticidade.

Entretanto, a dificuldade de desmodagem dos corpos de prova do cluster 5 juntamente com as curvas de tendência de compressão e módulo de elasticidade, indicam que o patamar de percolação do concreto utilizado está em algum ponto dentre 12 e 21 % de hidratação, estando mais perto do limite superior pela maior confiança na curva que cruza o eixo x do gráfico da Figura 78.

É importante ressaltar a dificuldade de cálculo do módulo de elasticidade dos graus mais baixos de hidratação (cluster 5). Nesses casos as curvas tensão-deformação tinham características majoritariamente plásticas, e a extração do módulo de elasticidade foi feito utilizando a função *Fit Linear* do software *OriginPro 8*, constando-se que o R^2

atingisse valor superior a 0,99. A escolha de utilizar esses valores para integrar a curva de tendência foi feita apenas após se verificar que os resultados se encaixavam na curva já traçada antes deles e melhoravam o valor de R^2 .

A Tabela 25 mostra o aumento considerável da dispersão do módulo de elasticidade em relação a curva de tendência com a diminuição da hidratação. O cluster 1 mostra-se menos variante, seguido pelos clusters 2 e 3 que estão em patamar de dispersão semelhantes entre si e um pouco mais elevado que o 1. O cluster 4 já apresenta um aumento significativo na dispersão, 5 vezes mais que os anteriores. Por último o cluster 5, já perto da hidratação correspondente do patamar de percolação, mostra uma variação muito grande, principalmente porque os valores inferiores a 20% de hidratação na curva de tendência são negativos.

Tabela 25 - Parâmetros estatísticos da dispersão do módulo de elasticidade em relação a linha de tendência

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Módulo relativo médio	Desvio quadrático médio	Desvio quadrático médio relativo
1	1,00	1,001	0,0659	0,0659
2	0,79	0,778	0,0678	0,0871
3	0,66	0,642	0,0532	0,0828
4	0,29	0,108	0,0439	0,4058
5	0,21	0,005	0,0359	7,8271

Diferentemente das análises anteriores, a curva de tendência do desvio quadrático médio não foi tão representativa, sendo uma curva potencial ($y = 0,0678x^{0,3901}$) de $R^2 = 0,9379$. Apesar disso, decidiu-se traçar uma curva do desvio quadrático médio relativo, nessa curvam devido as características da curva de tendência do módulo de elasticidade, ela apenas torna-se positiva a partir de 21%, por isso será considerado a curva apenas a partir desse grau de hidratação.

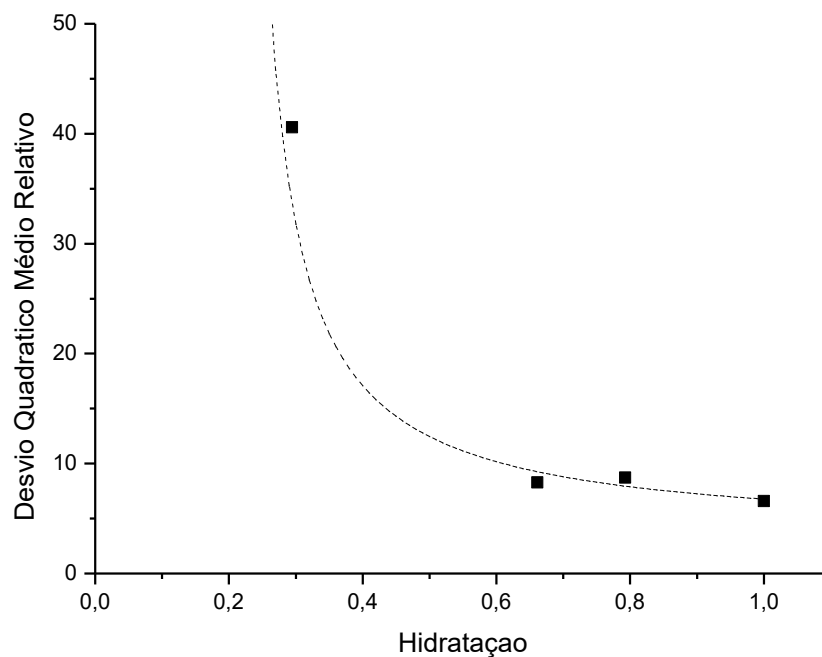


Figura 79 - Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo do módulo de elasticidade com grau de hidratação médio

A comparação dos módulos de elasticidade entre si dentro de um cluster mostrou resultados semelhantes aos obtidos na análise anterior, como visto na Tabela 26. Percebe-se que os resultados são relativamente semelhantes aos do desvio quadrático médio relativo.

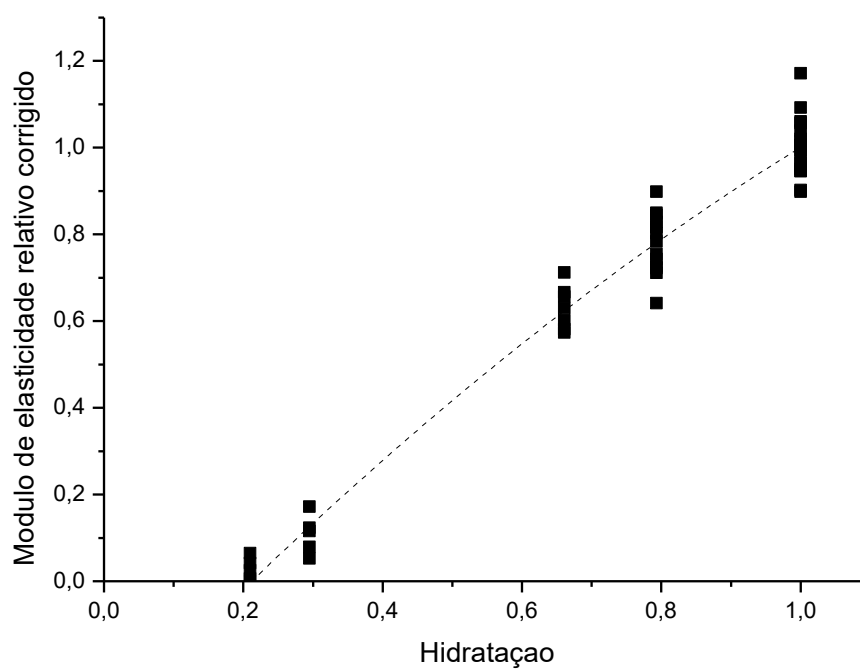


Figura 80 - Relação entre hidratação e o módulo de elasticidade relativo corrigida

Tabela 26 - Parâmetros estatísticos do módulo corrigido pela hidratação nos clusters

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
1	1,00	1,000	0,068	0,005	6,78
2	0,80	0,779	0,071	0,005	9,06
3	0,66	0,632	0,050	0,003	7,95
4	0,30	0,108	0,045	0,002	41,79
5	0,21	0,005	0,038	0,001	790,79

Nesse caso, porém, decidiu-se não traçar uma curva de coeficiente de variação por hidratação devido ao R^2 da curva representante do desvio padrão não ser superior a 0,9, ou seja, não tem representatividade suficiente para mostrar uma tendência.

Apesar dos primeiros resultados terem sido desconsiderados, a tendência é clara, a dispersão do módulo de elasticidade torna-se exponencial quando se aproxima do “patamar de percolação” teórico, quando a curva de tendência do módulo encosta no eixo x. Isso mostra que a plasticidade do concreto tem grande influência e que quando mais rígido o corpo, menor dispersão.

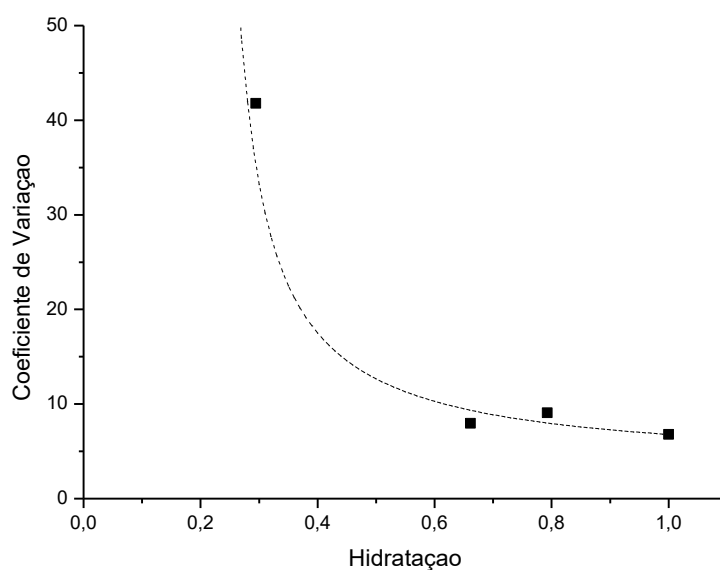


Figura 81 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação do módulo de elasticidade dentro dos clusters

5.3 Ensaio de flexão com 4 pontos

Serão apresentados os resultados extraídos dos ensaios mecânicos de flexão com 4 pontos e sua respectiva análise.

5.3.1 Resistência à compressão x Hidratação

A resistência a tração do concreto pode ser extraída do ensaio de flexão com quatro pontos como já foi explicado no capítulo anterior. A Figura 82 mostra a relação entre a tração relativa do concreto e a hidratação e que utilizando-se a ferramenta *Linear Fit* do *software OriginPro 8*, obtém-se uma curva polinomial de tendência com R^2 de 0,9762. Outros tipos de curva de tendência foram aplicados de modo a avaliar qual se adequava melhor, porém decidiu-se que essa curva além de um R^2 superior representava melhor o fenômeno.

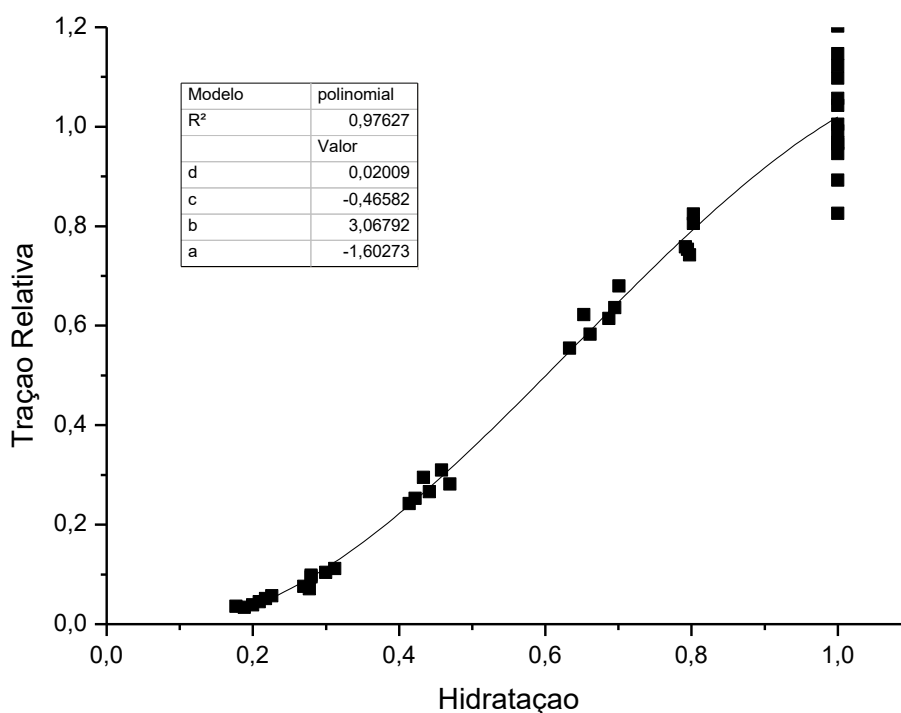


Figura 82 - Relação entre grau de hidratação e resistência à tração relativa

Fazendo a mesma análise do patamar de percolação feita nos gráficos anteriores, a linha de tendência corta o eixo x em 8%, indicando novamente a possibilidade de início no patamar de percolação nessa área, como já mostrado anteriormente na compressão.

A diferença de arranjo das amostras de flexão fez com que os cluster mudassem, os utilizados nas análises extraídas a partir do ensaio da flexão em 4 pontos podem ser visto na Tabela 27, apesar das diferenças, a divisão dos clusters seguem as mesmas características da anterior. As análises de dispersão dos resultados são as mesmas utilizadas anteriormente: dispersão em relação a linha de tendência e dispersão dentro do cluster.

Tabela 27 - Divisão de clusters do ensaio de flexão em 4 pontos

Número do cluster	Variação de hidratação (%)	Número de amostras	Hidratação média (%)	Tração relativa média
1	100	13	100,00%	1,00
2	79-81	5	79,78%	0,78
3	63-70	6	67,17%	0,61
4	41-46	6	43,98%	0,27
5	26-32	6	28,63%	0,09
6	17-23	6	20,29%	0,04

O resultado da aplicação do desvio quadrático médio dos resultados pode ser observado na Figura 83. A partir dos dados foi traçada com o *software Excel* uma curva de tendência polinomial de terceiro grau ($y = 0,7115x^3 - 1,0658x^2 + 0,5184x - 0,0635$) com um R^2 de 0,9941, considerada representativa dos resultados.

Assim como na compressão o desvio aumenta juntamente com a hidratação do concreto. Uma melhor avaliação pode ser feita a partir da curva do desvio quadrático médio relativo (Figura 84) traçada a partir das curvas de tendência mostradas na Figura 82 e Figura 83.

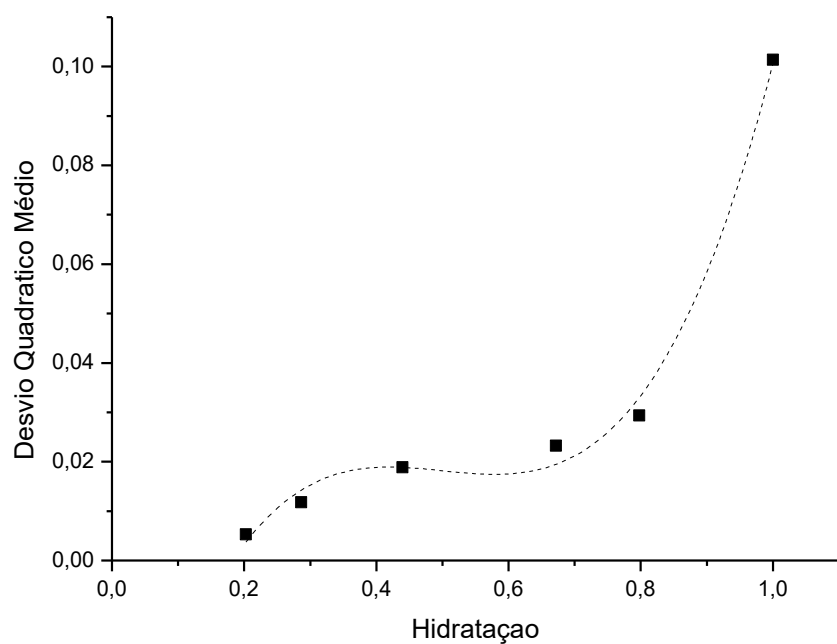


Figura 83 - Relação entre desvio quadrático médio com grau de hidratação médio dos clusters

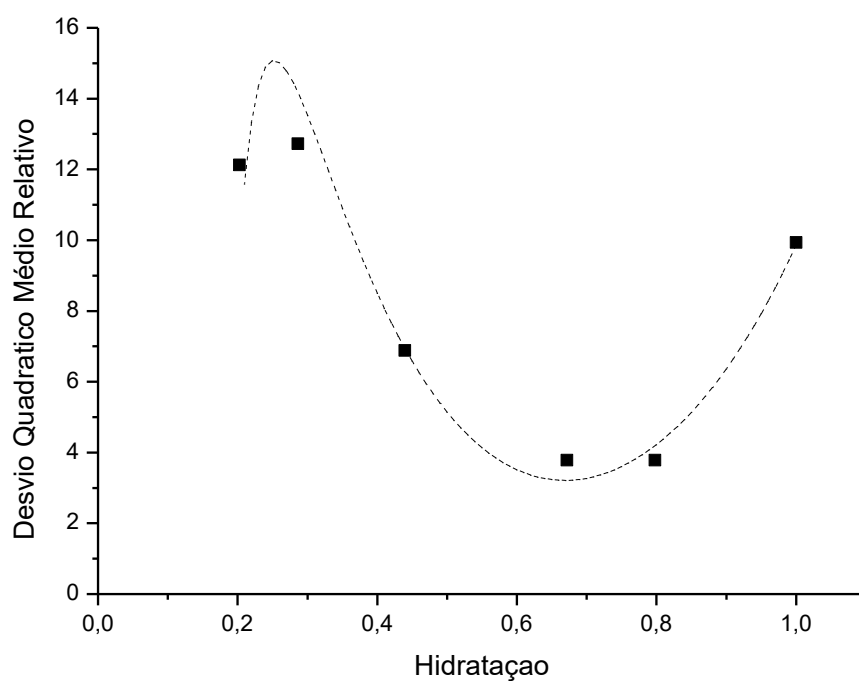


Figura 84 - Curva da relação entre desvio quadrático médio relativo com grau de hidratação médio

O gráfico do desvio quadrático médio relativo em relação a hidratação mostra um início semelhante ao da Figura 66 na compressão, apontado novamente um

crescimento da dispersão que indica o alcance do patamar de percolação. No resto da curva o resultado tende a uma queda, aumentando quando chega aos 100% de hidratação.

Esse resultado também é observado na análise dos clusters entre si visto na Tabela 28. Para essa análise foi feita a mesma correção aplicada na resistência a compressão em que todos os resultados são corrigidos para a hidratação média do cluster. O que se observa é um resultado extremamente semelhante a análise observada na análise anterior.

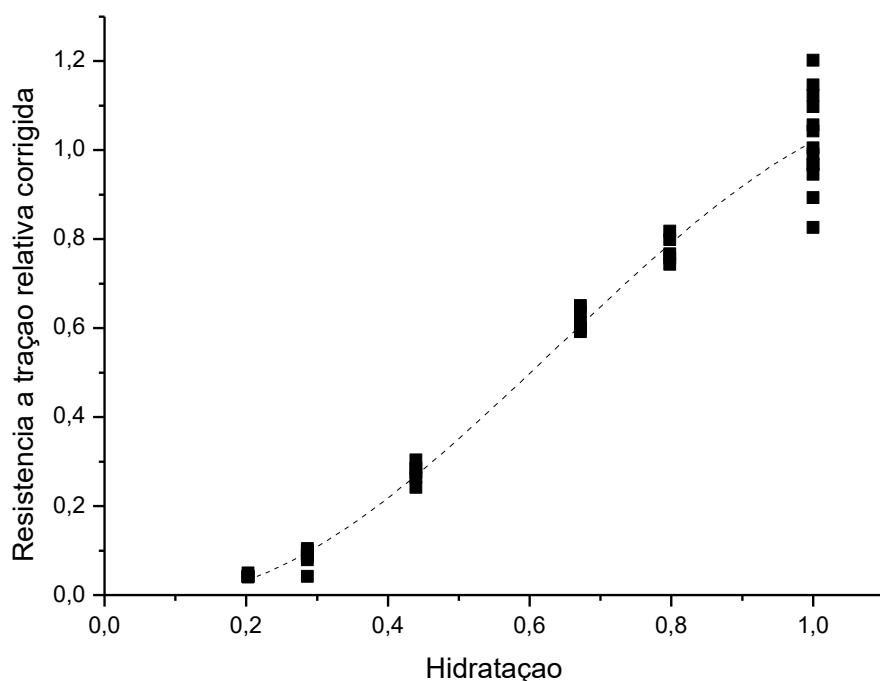


Figura 85 - Relação entre grau de hidratação e a resistência a tração relativa corrigida

Tabela 28 - Parâmetros estatísticos da resistência a tração corrigida nos clusters

Número do cluster	Média de hidratação (%)	Média	Desvio Padrão	Variância	Coefficiente de variação
1	1,000	1,020	0,106	0,01113	10,34
2	0,798	0,777	0,031	0,00094	3,94
3	0,672	0,615	0,023	0,00054	3,79
4	0,440	0,274	0,021	0,00042	7,51
5	0,286	0,092	0,009	0,00008	9,82
6	0,203	0,043	0,003	0,00001	7,41

Na análise dos clusters entre si, tanto a média de resistência a tração quando seu desvio padrão puderam ser representados por curvas polinomiais de terceiro grau, ambas com um R^2 superior a 0,99 sendo consideradas bem representativas. Essas duas curvas foram utilizadas para o cálculo de uma curva de coeficiente de variação observada na Figura 88.

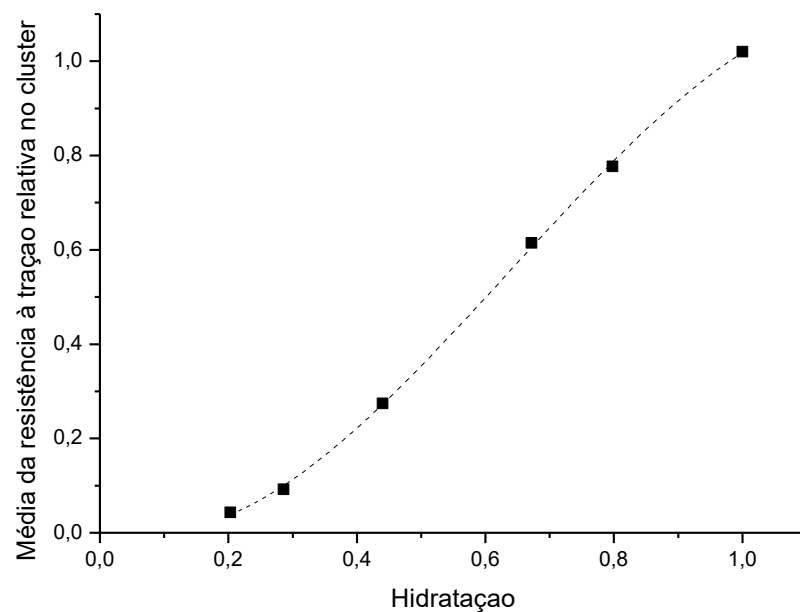


Figura 86 - Relação entre hidratação e média da resistência à tração relativa no cluster

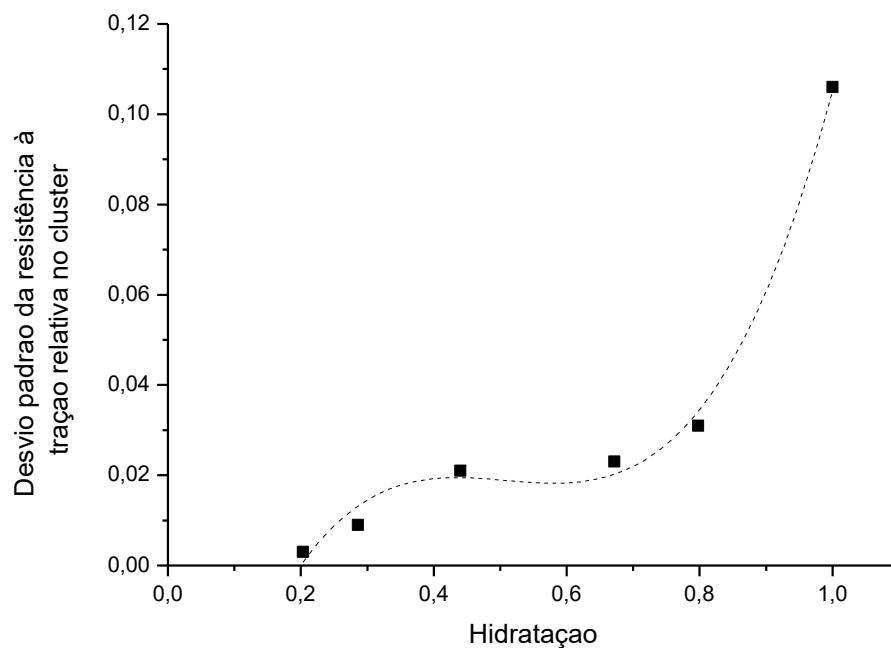


Figura 87 - Relação entre hidratação e desvio padrão da resistência à tração relativa no cluster

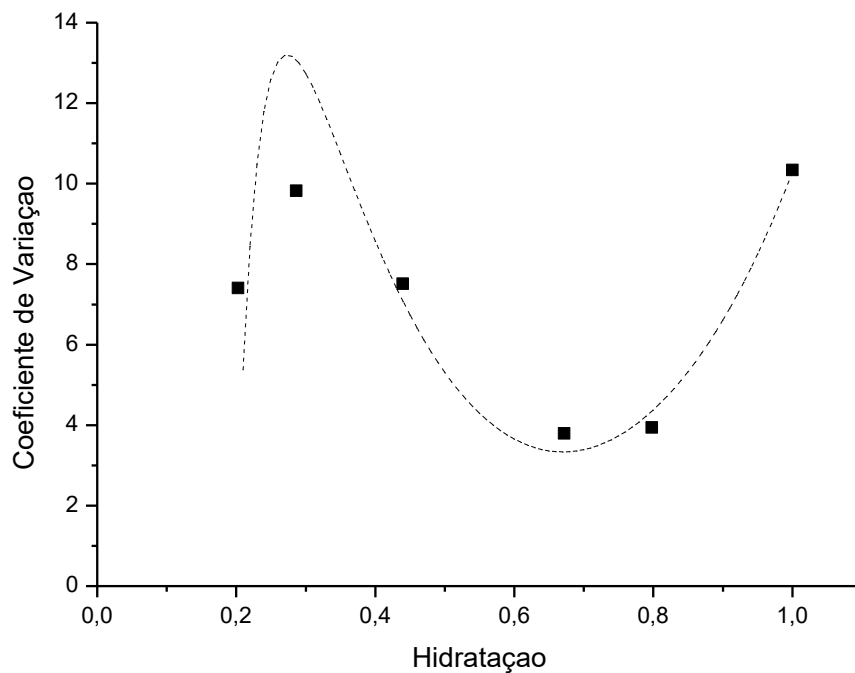


Figura 88 - Relação entre hidratação e coeficiente de variação da resistência a tração dentro dos clusters

Acredita-se que o aumento da dispersão dos resultados na hidratação completa ocorreu devido principalmente a divisão de amostras dentro do cluster. Uma quantidade maior de resultados mecânicos gera a maior variabilidade dos resultados.

5.4 UCA

O ensaio do usa visou principalmente avaliar quando ocorre a mudança de fase do concreto de dispersão para sólido. Para isso foi traçado o gráfico mostrado na Figura 89, da velocidade de pulso pelo tempo. Uma forma de calcular o momento em que ocorre o patamar de percolação é traçando uma reta em cima da parte estável da velocidade de pulso nas primeiras horas e outra na sua inclinação, o ponto de interseção entre elas indicara o momento aproximado do patamar de percolação.

Segundo o observado no gráfico o patamar de percolação foi alcançado a partir de 5h e 30 min aproximadamente de ensaio. Com o objetivo de sabe com qual grau hidratação é que o fenômeno ocorre, foram utilizadas curva calorimétricas já feitas cujas temperaturas iniciais eram semelhantes a inicial do ensaio de UCA ($23,5 \pm 1$ °C). O resultado variou entre 8 e 11 % de hidratação.

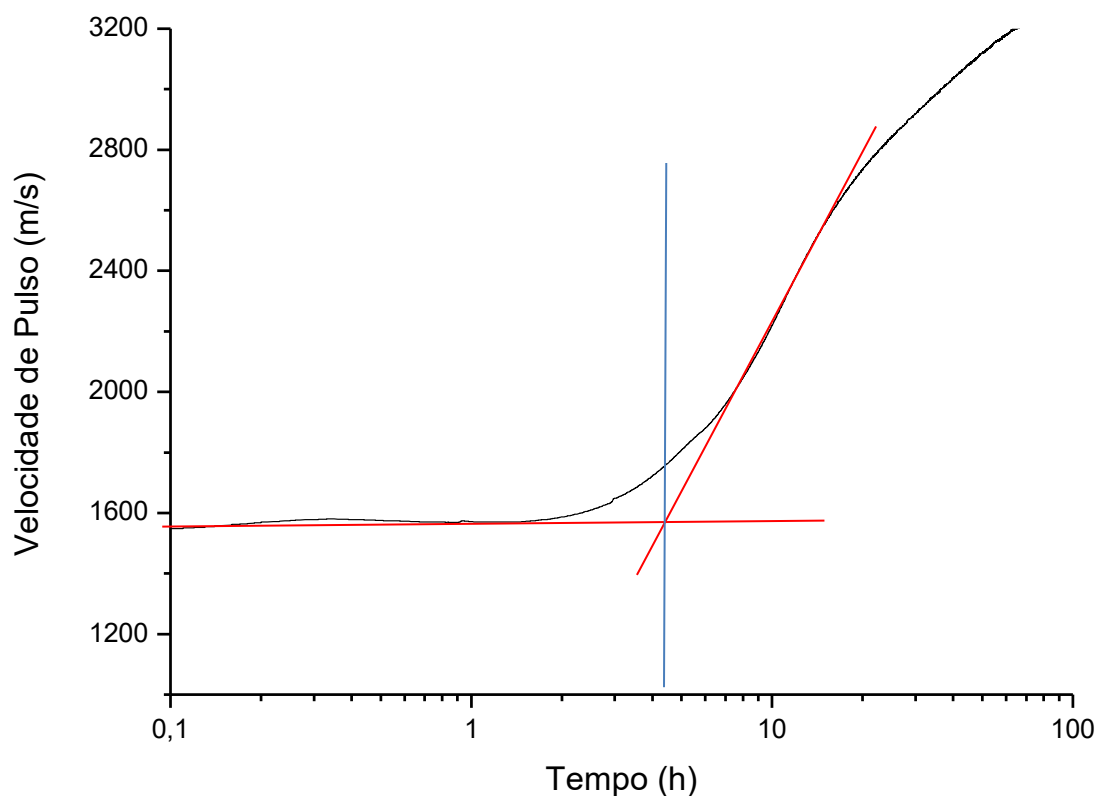


Figura 89 - Resultado do ensaio UCA

Nas análises feitas até aqui do patamar de percolação a partir de curvas de tendência obteve-se os valores de 8, 12 e 20% de hidratação respectivamente para tração, compressão e módulo de elasticidade da compressão. A variação de 8 a 11% obtido a partir do cruzamento do UCA com as calorimetrias está na mesma grandeza que esses resultados.

Vale ressaltar também que esse resultado obtido não é preciso por três motivos: a relação com a hidratação foi estabelecida através do tempo e não da temperatura como é feito nas calorimetrias, a temperatura constante do UCA não simula a aceleração da reação que ocorre no calorímetro devido o aumento da temperatura e também porque a pasta de cimento terá um fator água cimento efetivo superior ao do concreto utilizado, devido a absorção de água pelos agregados.

Tendo em vista as considerações acima, o ensaio do UCA objetivou estabelecer um patamar de ocorrência da transição de dispersão para sólido. Esse objetivo foi alcançado através dos valores obtidos mostrados acima. Para uma análise mais acurada do patamar de percolação e consequentemente para obtenção de curvas mais realistas de tensões e módulos de elasticidade Krauss e Hariri (2006) sugerem a utilização do ultrassom no concreto utilizado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A análise das calorimetrias adiabática e isotérmica mostrou que nos primeiros momentos do ensaio ocorre liberação de calor devido à dissolução dos grãos de cimento na água. A contribuição desta taxa de calor para o cálculo do calor total de hidratação deve ser considerada para que os resultados de diversos ensaios do mesmo material sejam comparáveis. Tendo em vista que, dependendo da temperatura inicial é variável a possibilidade de medição deste calor de dissolução, propõe-se que seja eliminado este trecho da curva para os cálculos do calor total de hidratação.

Curvas de tendências traçadas por *softwares* estatísticos se mostraram matematicamente precisas para a descrição de características mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade) em relação ao grau de hidratação. Elas também representaram satisfatoriamente parâmetros estatísticos relacionados às linhas de tendência (erro quadrático médio e erro quadrático médio relativo) e relacionados aos resultados dentro de um cluster (média, desvio padrão e coeficiente de variação).

A análise conjugada do pulso ultrassônico da pasta de cimento e calorimetria adiabática com as linhas de tendência traçadas, indicou que o patamar de percolação do concreto utilizado se situa entre 8 e 11% de hidratação.

As dispersões absolutas de todas as características mecânicas se mostraram maiores com o aumento da hidratação. A análise das dispersões relativas mostrou que, excetuando-se o fenômeno da tração, a heterogeneidade dos resultados tende a diminuir conforme o aumento da hidratação.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Automatização da correção das curvas de calorimetria adiabática a partir das características dessa parte da curva;
- Análise mais profunda do grau de hidratação referente ao patamar de percolação do concreto através de análise de ultrassom, de modo a dar mais precisão as curvas de tendência traçadas para as propriedades físicas do concreto;

- Análise da estrutura e composição do concreto em diversas idades observando principalmente fatores que influenciam na heterogeneidade como teor de água livre e porosimetria e como eles variam de acordo com o grau de hidratação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP. *Guia Básico De Utilização Do Cimento Portland*. São Paulo: Associação Técnica de Cimento Portland, 2002.
- ACKER, P. Comportement mécanique du béton: apports de l'approche physico-chimique. *Rapport de Recherche LCPC*, n. 152, p. 125, 1988.
- ACKER, P. Swelling, shrinkage and creep: A mechanical approach to cement hydration. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 37, n. 268, p. 237–243, 2004.
- AMARIO, M, 2015. *Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)*. Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 242p.
- CORDEIRO, G. C., 2006, *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz com aditivos minerais em concreto*, Tese de Doutorado., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 445p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 248: gregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro, 2015. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12819: Concreto e argamassa — Determinação da elevação adiabática da temperatura — Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório - Procedimento*. Rio de Janeiro, 2009. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*. Rio de Janeiro, 2017. 20 p.

BAROGHEL-BOUNY, V. Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials. Part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 3, p. 414–437, 2007.

BENTUR, A. Chapter 2: Terminology and definitions. In: BENTUR, A. *Early Age Cracking in Cementitious Systems*. Bagnoux: RILEM Publications, 2002.

BOUMIZ, A.; VERNET, C.; TENIUDJIT, F. C. Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages Evolution with Time and Degree of Hydration. *Advanced Cement Based Materials*, v. 3, n. 3–4, p. 94–106, 1996.

BRUNAUER, S; COPELAND, L. E. The chemistry of concrete. *Scientific American*, v. 210, n. 4, pp. 80–93, 1964.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, 2011.

CEMBUREAU. *Activity Report 2015, 2016*. Disponível em:

<https://cembureau.eu/media/1503/2015activityreport_cembureau.pdf>, acessado em 06/03/2018.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F. J. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 1, p. 67–80, 2004.

CORDEIRO, G. C., 2006, *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz com aditivos minerais em concreto*, Tese de Doutorado., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 445p.

FAIRBAIRN, E.M.R., *Concreto: A Física e a Química do Material, Módulo IV: Um modelo para a reação de hidratação: Ulm e Coussy*, COPPE/UFRJ-PEC, Notas de Aula, 2001.

FARIA, E. F., 2004, *Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 114p.

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. *Matériaux et Construction*, v. 1, n. 6, p. 509–520, 1968.

HEWLETT, P. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, 2004.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 71–80, 2015.

KAJASTE, R.; HURME, M. Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4041–4052, 2016.

KOLANI, B. et al. Hydration of slag-blended cements. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 9, p. 1009–1018, out. 2012.

KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. C. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14. ed. Skokie: Portland Cement Association, 2015.

KRAUSS, M.; HARIRI, K. Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. *Cement and Concrete Composites*, v. 28, n. 4, p. 299–306, 2006.

LACARRIÈRE L. et al. Chapter 2: Hydration and Heat Development. In: FAIRBAIRN, E. M. R; AZENHA, M. *Thermal Cracking of Massive Concrete Structures*. Cham: Springer, 2019.

LARRARD, F. DE. *Concrete mixture proportioning: A scientific approach*. 9. ed. London: E. & F.N. Spon. 2011.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MUJKA, F. On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests. *Polymer Testing*, v. 25, n. 2, p. 214–220, abr. 2006.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do concreto*. 2. ed. São Paulo: Pearson Education, 2010.

POPOVICS, S.; UJHELYI, J. Contribution to the Concrete Strength versus Water-Cement Ratio Relationship. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 20, n. 7, p. 459–463, jul. 2008.

RICHARDSON, I. G. Nature of C-S-H in hardened cements. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 8, p. 1131–1147, 1999.

ROSSI, P. et al. Scale effect on concrete in tension. *Materials and Structures*, v. 27, n. 8, p. 437–444, 1994.

ROSSI, P.; RICHER, S. Numerical modelling of concrete cracking based on a stochastic approach. *Materials and Structures*, v. 20, n. 5, p. 334–337, 1987.

SILVA, E. F., 2007, *Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração*. Tese de Doutorado., Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 332p.

SCHLANGEN, E.; VAN MIER, J. G. M. Simple lattice model for numerical simulation of fracture of concrete materials and structures. *Materials and Structures*, v. 25, n. 9, p. 534–542, 1992.

SCRIVENER, K. L. et al. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 9, p. 1541–1547, 2004.

SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 38–56, 2015.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 7, p. 651–665, 2011.

SHOUKRY, S. N. et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 2, p. 688–696, 2011.

SINGH, S. B.; MUNJAL, P.; THAMMISHETTI, N. Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar. *Journal of Building Engineering*, v. 4, p. 94–100, 2015.

TAILHAN, J. L.; PONT, S. D.; ROSSI, P. From local to global probabilistic modeling of concrete cracking. *Annals of Solid and Structural Mechanics*, v. 1, n. 2, p. 103–115, 2010.

TAN, K.; GJORV, O. E. Performance of concrete under different curing conditions. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 3, p. 355–361, mar. 1996.

TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. London: Academic Press, 1990.

TENNIS, P. D.; JENNINGS, H. M. A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 6, p. 855–863, jun. 2000.

TORRENTI, J. M. et al. Stereophotogrammetry and Localization in Concrete under Compression. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 117, n. 7, p. 1455–1465, jul. 1991.

TRTNIK, G. et al. Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 11,

p. 1336–1342, 2008.

ULM, F.-J.; COUSSY, O. Modeling of Thermochemomechanical Couplings of Concrete at Early Ages. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 121, n. 7, p. 785–794, 1995.

ULM, F.-J.; COUSSY, O. Strength Growth as Chemo-Plastic Hardening in Early Age Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 122, n. 12, p. 1123–1132, 1996.

WADSÖ et al. Chapter 2: Calorimetry. In: SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHEBACH, B. *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2016.

WANG, X.; YANG, Z.; JIVKOV, A. P. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture of concrete with random aggregates and pores: A size effect study. *Construction and Building Materials*, v. 80, p. 262–272, 2015.

WEIBULL, W. Wide applicability. *Journal of applied mechanics*, v. 103, p. 293–297, 1951.

APÊNDICE A: DOSAGEM DO CONCRETO ATRAVÉS DO SOFTWARE BETONLAB PRO 3

A dosagem do concreto utilizando o *software Betonlab PRO 3* foi executada em três passos: desenvolvimento do banco de dados dos constituintes, calibração dos parâmetros “p” e “q” e a dosagem em si.

A.1 Banco de dados de constituintes

Primeiramente, foi necessário desenvolver um banco de dados dos constituintes que foram utilizados na mistura de concreto, cimento, areia e brita, e suas características. O passo a passo será apresentado nas figuras abaixo e os métodos e resultados da caracterização podem ser observados no capítulo 3.

Na Figura 90 mostra o banco de dados de constituintes do software, que é necessário criar uma pasta para adicionar os novos constituintes que foram previamente caracterizados usando os padrões locais no Brasil, a ABNT.

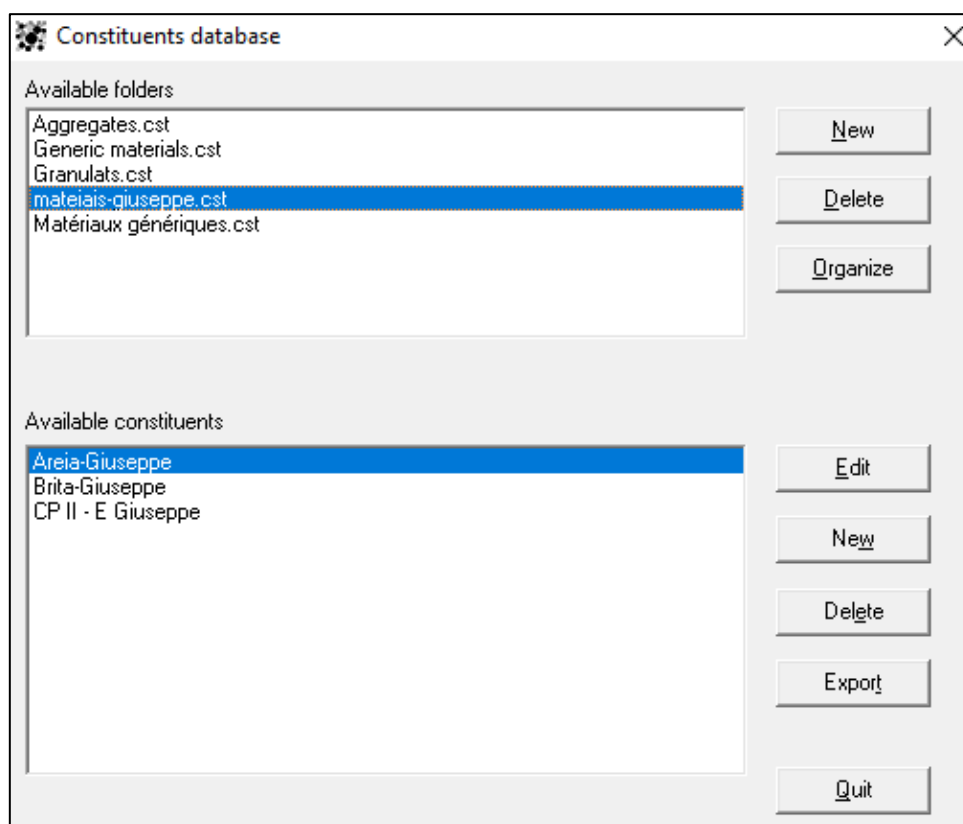
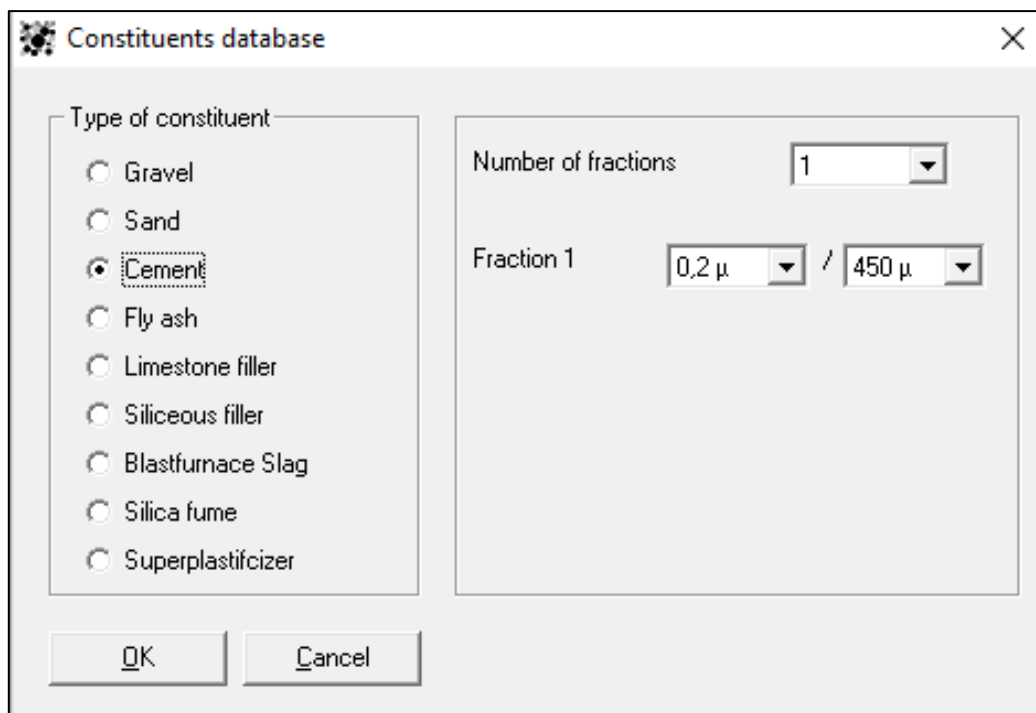


Figura 90 - Banco de dados de constituintes

A.1.1 Cimento

Para criar o cimento como um novo constituinte no software é necessário selecionar o número de frações em que o material será dividido e a sua respectiva variação de granulometria, como pode ser visto na Figura 91.



The image shows a software window titled "Constituents database". On the left, under "Type of constituent", there is a list of materials with radio buttons: Gravel, Sand, Cement (which is selected), Fly ash, Limestone filler, Siliceous filler, Blastfurnace Slag, Silica fume, and Superplastificizer. On the right, there is a section for "Number of fractions" with a dropdown menu set to "1". Below that, "Fraction 1" is defined by two dropdown menus showing "0,2 μ" and "450 μ" separated by a slash. At the bottom of the window are "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 91 - Seleção de cimento como constituinte

Na sequência, o cimento é nomeado e suas características como composição, resistência, densidade, classificação e embalagem são inseridas no banco de dados do software. O passo a passo pode aparecer nas Figura 92, 96, 97, 98, 99 e 100.

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: CP II - E Giuseppe

Date:

Comments: Superplasticizer used: none

Cost (Euro/t):

Save

Cancel

Tools

Figura 92 - Nomeação do cimento

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Constituents

% Clinker (K)	83
% Fly ash (V)	0
% Limestone (L)	0
% Natural pozzolan (Z)	0
% Blastfurnace slag (S)	17
% Silica fume (D)	0
% Others	0

Bogue composition

% C3S	9,37
% C2S	54,37
% C3A	12,37
% C4AF	6,48
% Others	17,41

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save

Cancel

Tools

Figura 93 - Constituição do cimento

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Comp. strength at 1 day	11,87
Comp. strength at 2 days	
Comp. strength at 3 days	24,25
Comp. strength at 7 days	37,23
Comp. strength at 28 days	56,12
Comp. strength at 90 days	
Comp. strength at 360 days	

Density (kg/m3) 3118

Heat capacity (kJ/K/Kg)

Saturation amount (%)

Autogeneous shrinkage

K_c (MPa)

Save
Cancel
Tools

Figura 94 - Características principais do cimento

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
0,2 μ	0	0,4712	
0,224 μ	0	0,4712	
0,25 μ	0,02	0,4712	
0,28 μ	0,1	0,4712	
0,315 μ	0,11	0,4712	
0,355 μ	0,27	0,4712	
0,4 μ	0,82	0,4712	
0,45 μ	0,82	0,4712	
0,5 μ	1,21	0,4712	
0,56 μ	1,4	0,4712	
0,63 μ	1,66	0,4712	
0,71 μ	2,18	0,4712	
0,8 μ	2,75	0,4712	
0,9 μ	3,36	0,4712	

Graph

Save
Cancel
Tools

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Figura 95 - Granulometria do cimento

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 0,2 μ / 450 μ

Without admixture

Experimental packing density: 0,5679

Packing index: 6,7

Confinement: No

With saturation amount

Experimental packing density:

Packing index:

Confinement: No

Save

Cancel

Tools

Figura 96 - Propriedades experimentais de empacotamento do cimento

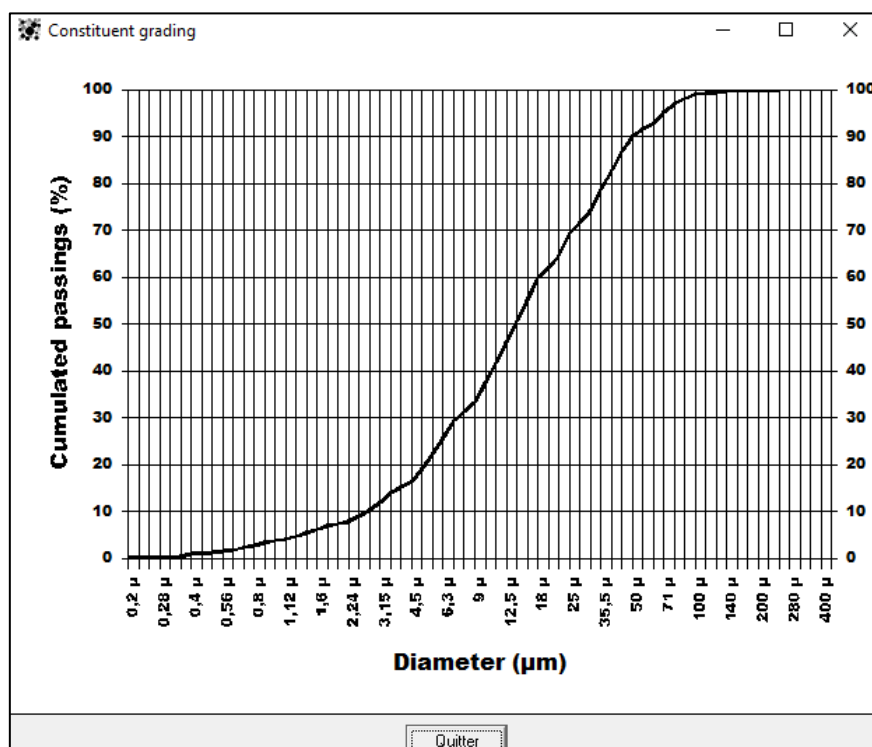
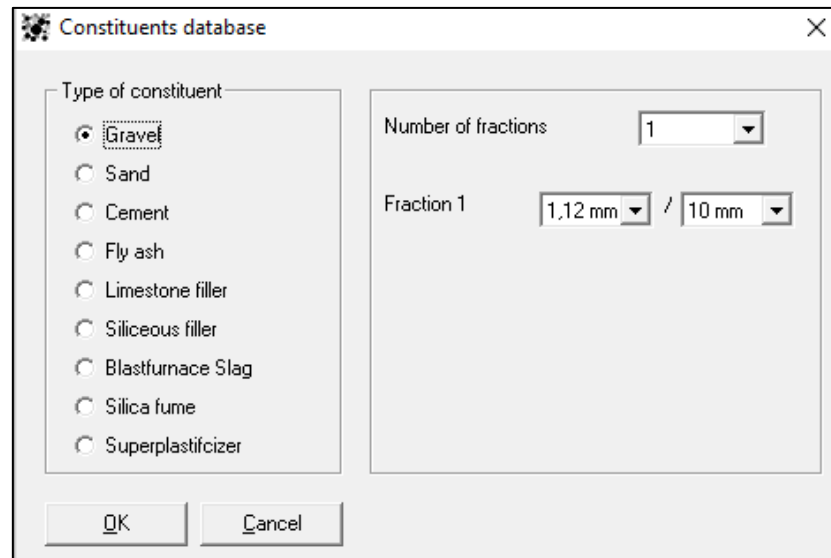


Figura 97 -Resultado do software para granulometria do cimento

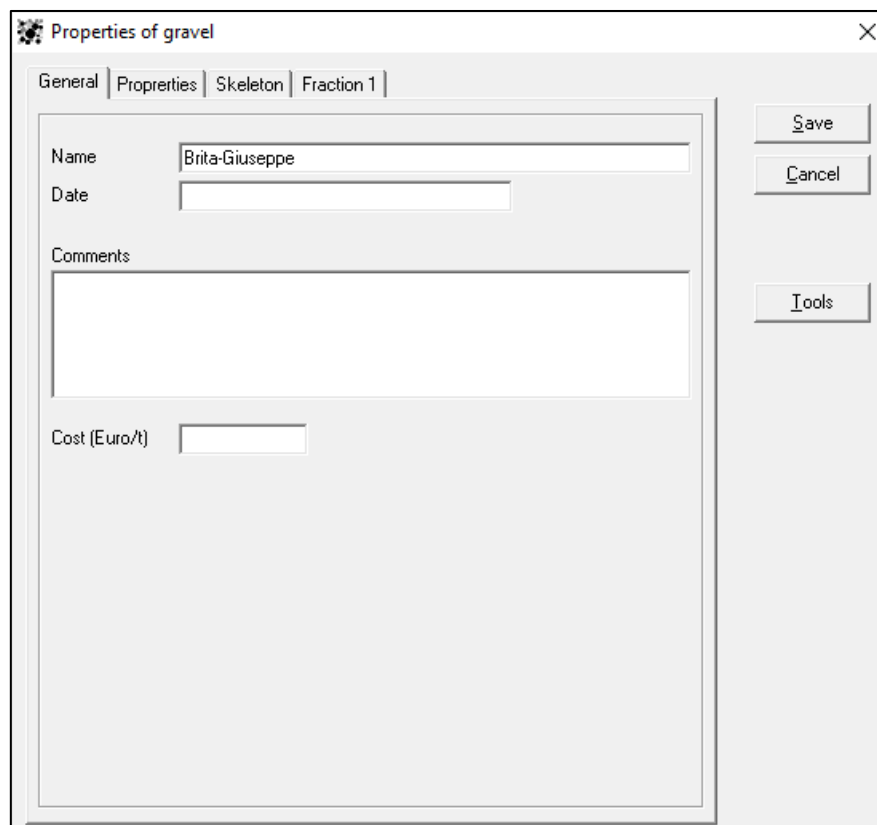
A1.2 Brita

O preenchimento de entrada das propriedades do cascalho é semelhante ao do cimento, exceto a composição. As Figura 98, 102, 103, 104, 105 e 106 mostram os procedimentos de preenchimentos do branco de dados de características da brita.



The image shows a software dialog box titled "Constituents database". It contains a group box "Type of constituent" with several radio button options: "Gravel" (selected), "Sand", "Cement", "Fly ash", "Limestone filler", "Siliceous filler", "Blastfurnace Slag", "Silica fume", and "Superplastificizer". To the right, there is a "Number of fractions" dropdown menu set to "1", and below it, a "Fraction 1" field showing "1,12 mm" and "10 mm" separated by a slash. At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

Figura 98 - Seleção de brita como constituinte



The image shows a software dialog box titled "Properties of gravel". It has four tabs: "General", "Properties", "Skeleton", and "Fraction 1", with "General" currently selected. The "General" tab contains fields for "Name" (filled with "Brita-Giuseppe"), "Date" (empty), "Comments" (a large empty text area), and "Cost (Euro/t)" (empty). On the right side of the dialog are three buttons: "Save", "Cancel", and "Tools".

Figura 99 - Nomeando a brita

Properties of gravel

General Properties Skeleton Fraction 1

Bond coef. p 0,474

Ceiling coef. q (MPa⁻¹) 0,00103

Traction coef. Kt (MPa^{-0.43})

Elastic modulus (GPa)

Density (kg/m³) 2873,01

Water absorption (%) 1,39

Heat capacity (kJ/K/Kg)

mean % of active alkali

maximum % of active alkali

Save

Cancel

Tools

Figura 100 - Propriedades da brita

Properties of gravel

General Properties Skeleton Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
1,12 mm	0	0,6687	
1,25 mm	1,31	0,6687	
1,4 mm	1,31	0,6687	
1,6 mm	1,4	0,6687	
1,8 mm	1,4	0,6687	
2 mm	1,5	0,6687	
2,24 mm	1,5	0,6687	
2,5 mm	2,6	0,6687	
2,8 mm	3,8	0,6687	
3,15 mm	5	0,6687	
3,55 mm	6,2	0,6687	
4 mm	7,4	0,6687	
4,5 mm	8,65	0,6687	
5 mm	16,7	0,6687	

Graph

Tools

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Save

Cancel

Figura 101 - Granulometria da brita

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction 1,12 mm / 10 mm

Without admixture

Experimental packing density 0,6347

Packing index 9

Confinement Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

Ø 160

H 320

Save

Cancel

Tools

Figura 102 - Propriedades experimentais de empacotamento da brita

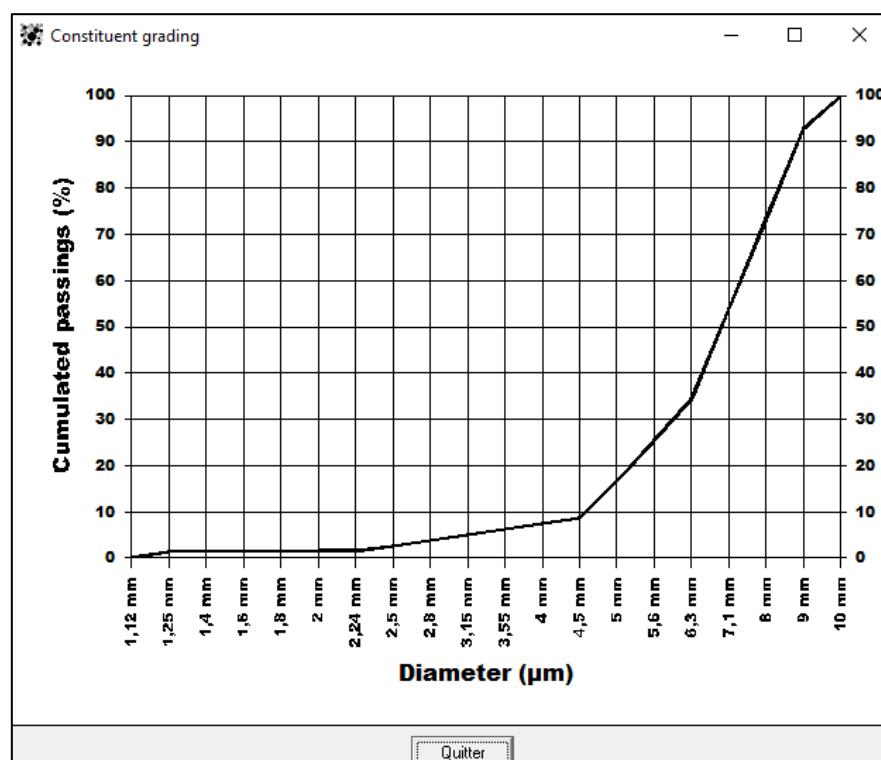
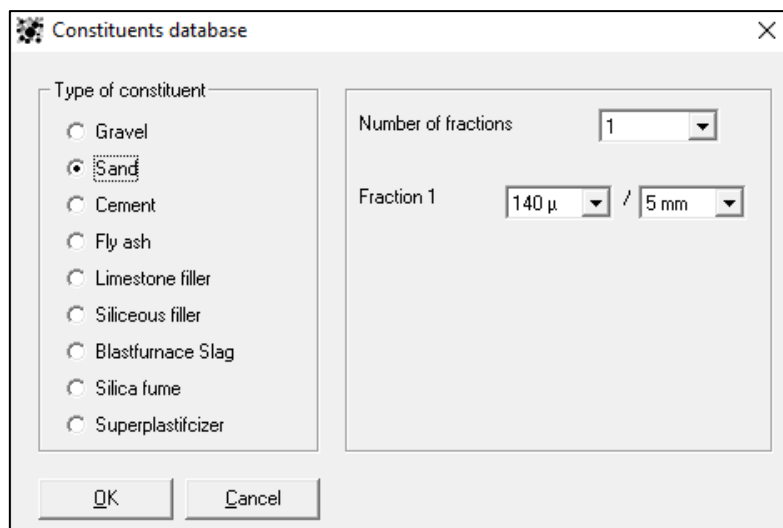


Figura 103 - Resultado do software para granulometria da brita

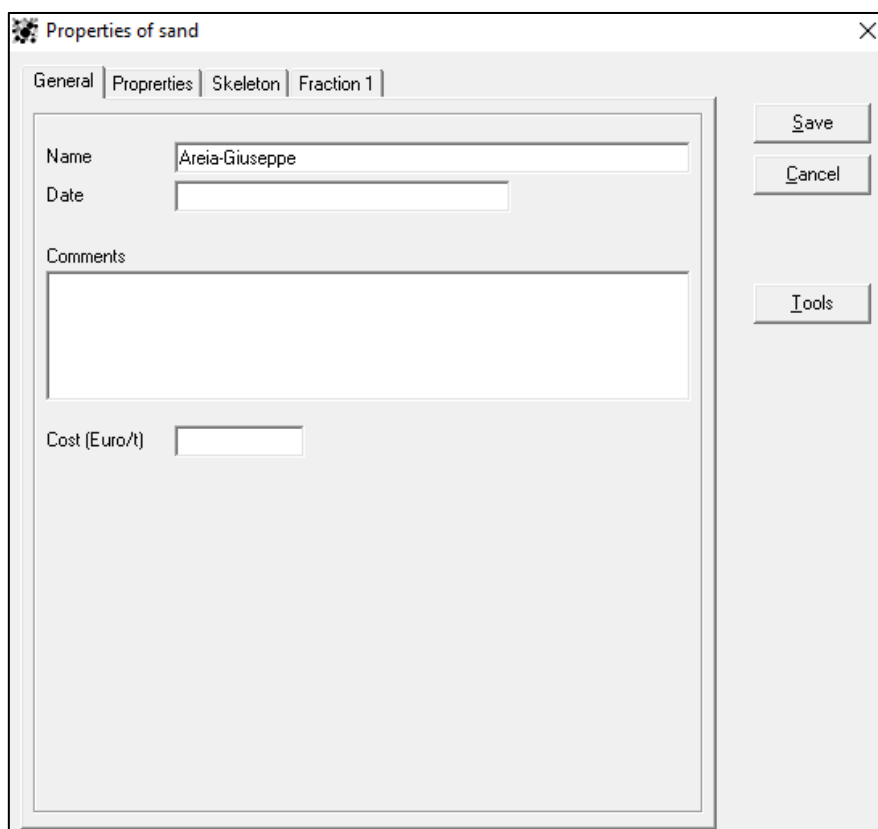
A1.3 Areia

O preenchimento de entrada das propriedades da areia é semelhante ao da brita. As Figura 104, 108, 109, 110, 111 e 122 mostram os procedimentos para preencher o banco de dados de características da areia.



The 'Constituents database' dialog box is shown. It has a title bar with a close button. Inside, there's a 'Type of constituent' section with radio buttons for Gravel, Sand (selected), Cement, Fly ash, Limestone filler, Siliceous filler, Blastfurnace Slag, Silica fume, and Superplastificizer. To the right, 'Number of fractions' is a dropdown set to 1. Below that, 'Fraction 1' is shown with two dropdowns: '140 µ' and '5 mm'. At the bottom are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 104 - Seleção de areia como constituinte



The 'Properties of sand' dialog box is shown. It has a title bar with a close button. Below the title bar are tabs: General (selected), Properties, Skeleton, and Fraction 1. The 'General' tab contains fields for Name (Areia-Giuseppe), Date, Comments (a large text area), and Cost (Euro/t). On the right side, there are buttons for Save, Cancel, and Tools.

Figura 105 - Nomeando a areia

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Bond coef. p: 0,474

Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0,00103

Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}):

Elastic modulus (GPa):

Density (kg/m³): 2370,87

Water absorption (%): 0,74

Heat capacity (kJ/K/Kg):

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save

Cancel

Tools

Figura 106 - Propriedades da areia

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
140 μ	0	0,6916	
160 μ	3,07	0,6916	
180 μ	5,4	0,6916	
200 μ	7,5	0,6916	
224 μ	9,8	0,6916	
250 μ	11,9	0,6916	
280 μ	14,2	0,6916	
315 μ	18,9	0,6916	
355 μ	23,7	0,6916	
400 μ	28,4	0,6916	
450 μ	33,2	0,6916	
500 μ	37,4	0,6916	
560 μ	41,89	0,6916	
630 μ	47,6	0,6916	

Graph

Tools

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Save

Cancel

Figura 107 - Granulometria da areia

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 140 μ / 5 mm

Without admixture

Experimental packing density: 0,7451

Packing index: 9

Confinement: Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

$\varnothing$: 160

H: 320

Save

Cancel

Tools

Figura 108 - Propriedades experimentais de empacotamento da areia

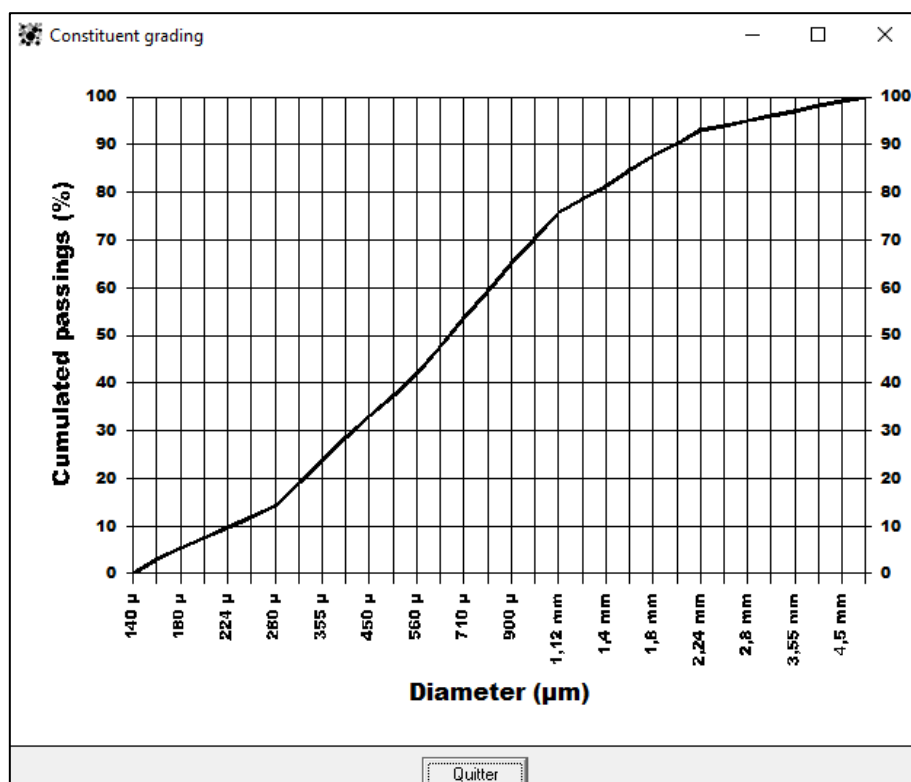


Figura 109 - Resultado do software para granulometria da areia

A.2 Calibração dos parâmetros “p” e “q”

O segundo passo da dosagem é a calibração agregada. O parâmetro “p” está relacionado à aderência dos grãos à pasta de cimento e o parâmetro “q” à resistência intrínseca do agregado (AMARIO, 2015).

Após selecionar “*aggregate calibration*”, como mostra a Figura 110, foram selecionados o banco de dados e os constituintes da mistura desejada de concreto, cimento, brita e areia em nosso caso (Figura 111).

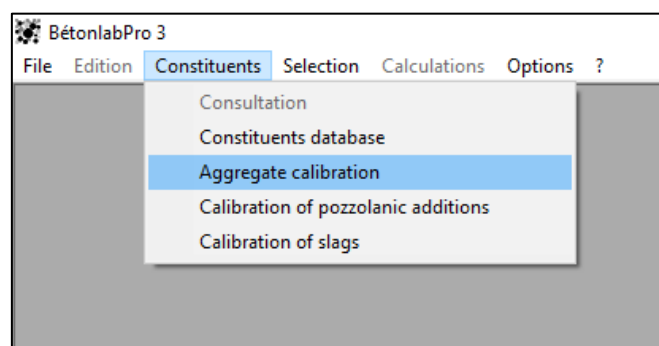


Figura 110 - Calibração dos agregados

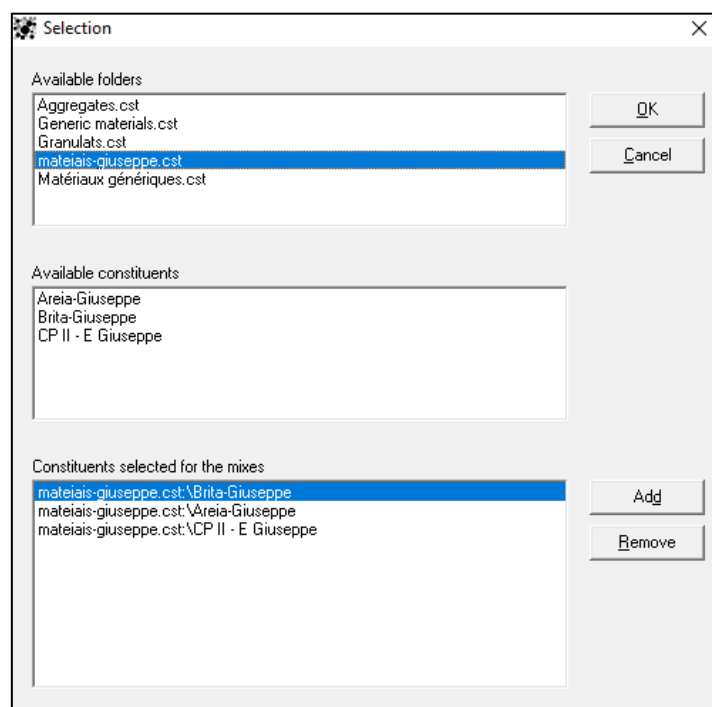


Figura 111 - Seleção dos constituintes

Então, como mostrado na Figura 112, foi inserido a quantidade de compostos e a respectiva resistência dos concretos e argamassas “ricos” e “pobres”, totalizando quatro diferentes misturas, já mostradas no Capítulo 3.

Concrete n°	1	2	3	4
G1 (kg)	1000.14	1000.14	0	0
S1 (kg)	599.92	800.03	100.5601	1599.85
C1 (kg)	499.86	250.14	620.01	340.45
W (kg)	200.03	190.02	272.64	250.5
Total air (%)				
AEA	No	No	No	No
fc1 (MPa)				
fc2 (MPa)				
fc3 (MPa)	23.01	6.2	17.98	3.89
fc7 (MPa)	32.35	8.95	23.05	5.9
fc28 (MPa)	39.61	13.46	24.73	8.26
fc90 (MPa)				
fc360 (MPa)				

Figura 112 - Colocando dados para calibração

Figura 113 - Selecionar que nenhum parâmetro será imposto

O resultado foi mostrado na Figura 114.

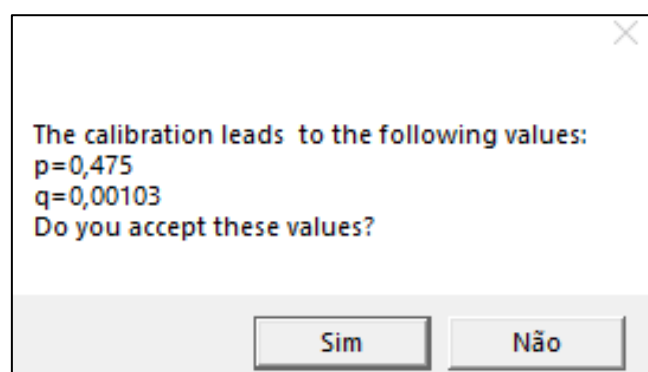


Figura 114 - Resultado de parâmetros

A.3 Dosagem do concreto

O último passo consiste na dosagem em si, quando é necessário seleccionar o material que fará parte da mistura de concreto e os parâmetros necessários para observação no concreto, como mostra a Figura 115 e Figura 116.

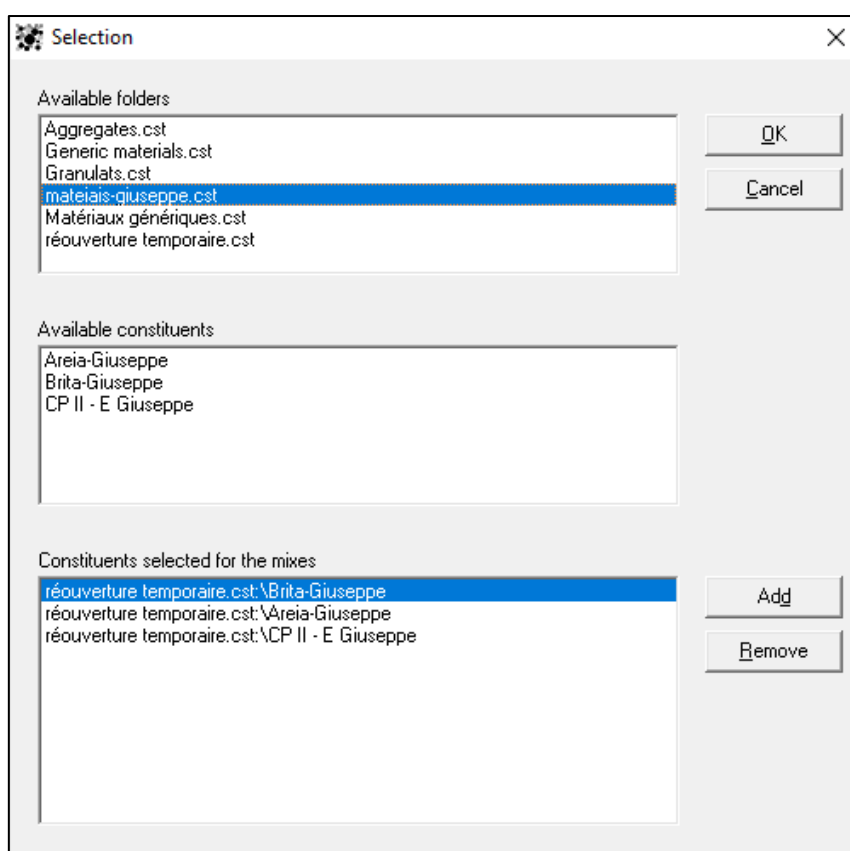


Figura 115 - Selecionando constituintes da mistura

Options for calculations

Fixed cost (Euro/m3)

Alkali in water

mean % of active alkali

maximum % of active alkali

Confinement

Type

Enter the dimensions of the cylinder in mm

Ø

H

Select the properties you want to display

- ☒ C + kA
- ☒ $W_{eff} / (C + kA)$
- ☒ Specific gravity
- ☒ Stabilization time on wattmeter (s)
- ☒ Shear yield stress (Pa)
- ☒ Plastic viscosity (Pa.s)
- ☒ Slump (cm)

Properties not available (data are missing)

- ☒ f_{t28} (MPa)
- ☒ E_{i28} (GPa)
- ☒ Heat capacity (kJ/Kg)
- ☒ Adiabatic temperature rise (°C)
- ☒ Autogeneous shrinkage (10-6)

Buttons: OK, Cancel, Select all, Deselect all, Info

Figura 116 - Escolha de propriedades a serem fornecidas pelo programa

Finalmente, a resistência do concreto é calculada através da alteração de alguns parâmetros da mistura como proporções de porcentagem de areia e brita, quantidade de cimento por volume de concreto e relação água/cimento efetiva até a obtenção do valor desejado. O resultado final da mistura de concreto pode ser visto na Figura 117.

BétonlabPro 3 - [Sheet1.btl]

File Edition Constituents Selection Modifications Options ?

Composition

G1 (%)

S1 (%)

C1 (kg/m3)

Eff. W (kg/m3)

Air entraining agent?

☒ No

☐ Yes

Environnement

Fixed cost

mean % of active alkali in water

maximum % of active alkali in water

Confinement: Cylinder (mm)

Ø

H

Batch

Optimise

Concrete n°1

Grading

Filling

Concrete n°	1
G1 (kg/m3)	1169,1
S1 (kg/m3)	519,5
C1 (kg/m3)	550
W (kg/m3)	210,1
G1 (%)	65
S1 (%)	35
Eff water	190
Total air (%)	0,8
AEA	No
G/S ratio	2,25
W _{eff} /C	0,345
Environment	X0
C + kA	550
W _{eff} / (C + kA)	0,345
Specific gravity	2,449
Stabilization time on wattmeter (s)	104
Shear yield stress (Pa)	4404
Plastic viscosity (Pa.s)	213
Slump (cm)	0
Initial bleeding speed (10-5 m.min-1)	0,11
fc1 (MPa)	13,9
fc2 (MPa)	21
fc3 (MPa)	25,3
fc7 (MPa)	33,1
fc28 (MPa)	40
fc90 (MPa)	45,6
fc360 (MPa)	52
Segregation index (confined)	0,937
Packing index of unconfined concrete	6,778
Packing index of confined concrete	7,135
Fines contribution K'f	3,357
Coarse gravel contribution K'gg	2,135
Packing of unconfined skeleton Ø*	0,838
Aggregate packing g*	0,8009

Figura 117 - Resultado da dosagem

APÊNDICE B: MÓDULO DE ELASTICIDADE (ENSAIO DE FLEXÃO) X HIDRATAÇÃO

Devido as diferenças significativas entre os resultados para os dois LVDTs utilizados, serão feitas análises separadas. Essas diferenças ocorreram apenas no relativo ao deslocamento do corpo de prova, não abrangendo a força máxima utilizada. Os resultados dos módulos de elasticidade relativo com suas respectivas curvas de tendência podem ser visto na Figura 118 e Figura 119.

O que se percebe é uma grande dispersão de resultados, diferentemente do mostrando na Figura 78 quando o módulo foi extraído da compressão. Ambas são curvas potenciais, sendo o primeiro com R^2 de 0,7859 e o segundo com 0,8984, mostrando que o LVDT superior permitiu a obtenção de resultados mais coesos que o inferior.

O resultado mostra que apesar das curvas mostrarem uma tendência elas não são bem representativas se comparadas as outras obtidas anteriormente, em que o valor de R^2 era muito próximo a 1.

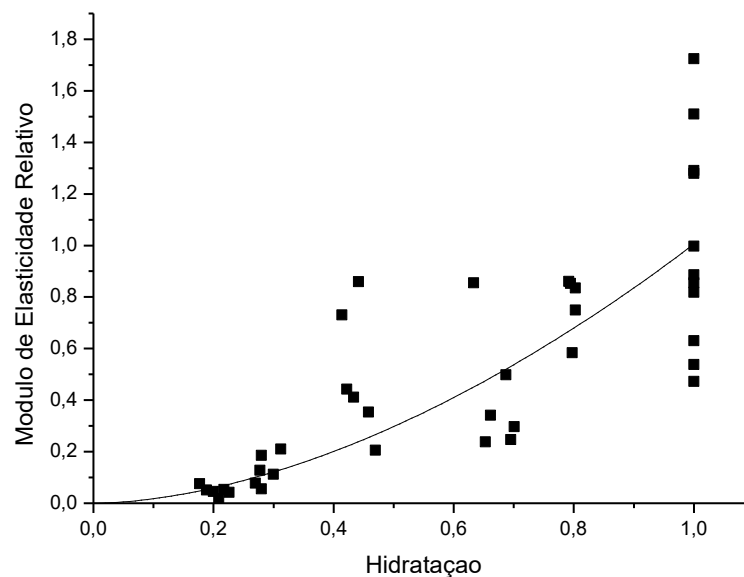


Figura 118 - Relação entre grau de hidratação e módulo de elasticidade (LVDT inferior)

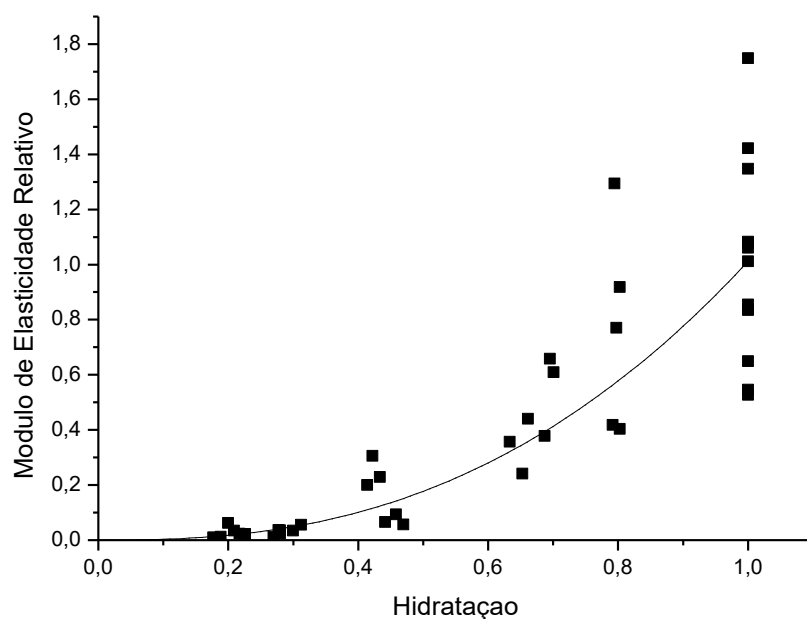


Figura 119 - Relação entre grau de hidratação e módulo de elasticidade (LVDT superior)

O módulo de elasticidade do concreto é calculado segundo a ABNT 8522 (2017) que utiliza para isso o ensaio de compressão. Durante a flexão em 4 pontos o centro do corpo de prova está submetido unicamente um momento de modo que o concreto tem seu rompimento por tração nas fibras inferiores, devido a sua baixa resistência a esse tipo de esforço. A ruptura do concreto é mais frágil nessas situações, diminuindo em parte a homogeneidade dos resultados (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Os resultados absolutos de módulo de elasticidade do ensaio de compressão e a partir de dois LVDTs em diferentes posições no ensaio de flexão em 4 pontos pode ser observado na Figura 120.

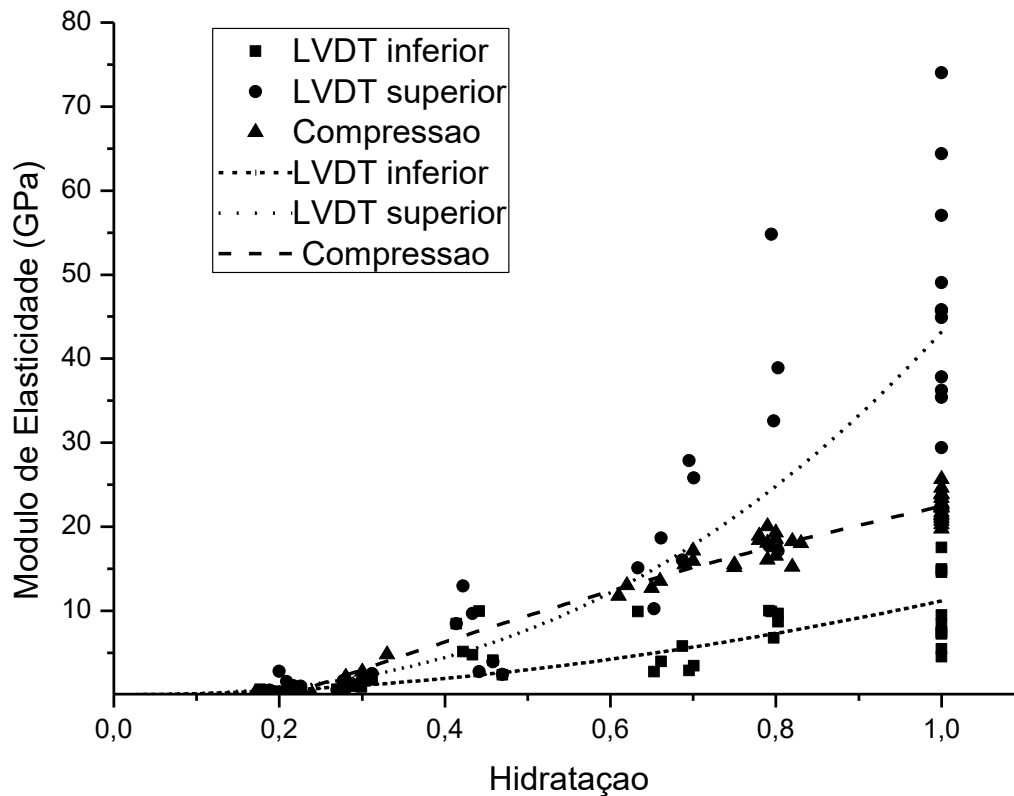


Figura 120 - Módulo de elasticidade absoluto do concreto em relação a hidratação

O resultado mostra diferenças significativas tanto os resultados em si quanto nas linhas de tendências traçadas para cada um. Além de mostrarem dispersões bem superiores, o modo de elasticidade devido a tração tem uma linha de tendência de formato diferente daquela observada na compressão.

Os LVDTs mostraram resultados bem diferentes entre si quando se analisa o módulo de elasticidade de forma absoluta. O superior mostrou resultados bem acima do inferior numericamente também tem resultados menos dispersos. Esse resultado diferente é provavelmente proveniente de deslocamentos que ocorre nos apoios e que são captados pelo LVDT inferior e não captados pelo superior (MUJIKA, 2006), que já o segundo mede as deformações em relação ao próprio corpo. A consequência disso é que o sensor inferior capta deformações maiores e consequentemente módulo de elasticidade menor, como visto no gráfico.