

Ensaio e Modelação de Comportamento Térmico de Pastas e Argamassas de Elevado Desempenho nas Primeiras Idades

LUÍS MIGUEL RIBEIRO DA SILVA FONSECA OLIVEIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Doutor João Filipe Meneses Espinheira Rio

Co-Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques Faria

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais

"O êxito começa no momento exato em que o homem decide o que quer e começa a trabalhar para o conseguir" (Roberto Shinyashiki)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar apresento um agradecimento especial aos meus pais e irmãos, por em toda a minha vida me terem apoiado, encorajado e motivado.

Gostava de agradecer ao meu orientador Doutor João Rio pelo apoio, total disponibilidade e paciência ao longo do semestre, teve sem dúvida um papel essencial no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Rui de Faria pela disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Eng.º José Conceição pela importante ajuda no desenvolvimento da modelação.

À Eng.ª Paula Silva e ao Cláudio Ferraz pelo apoio no desenvolvimento dos ensaios laboratoriais.

Aos meus colegas e amigos por todo o apoio e companhia ao longo do semestre.

RESUMO

O trabalho desenvolvido ao longo da presente dissertação foi desenvolvido em conjunto com o projeto FCT PTDC/ECM/122446/2010 Betofibra – Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em solução inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade, levado a cabo na unidade de investigação LABEST do Departamento de Engenharia Civil da FEUP.

A evolução da construção civil obrigou ao desenvolvimento de betões com resistências superiores que utilizam grandes quantidades de cimento. Esse cimento reage quimicamente com a água levando a uma reação exotérmica que, combinada com o arrefecimento posterior, gera no betão deformações que podem resultar em fissuração precoce das estruturas.

O objetivo desta dissertação é a compreensão do comportamento térmico nas primeiras idades, isto é até às 48 horas, em betões de alto desempenho. Através da comparação de resultados obtidos em ensaios laboratoriais e modelos numéricos, realizou-se um estudo de compreensão do calor expectável a ser libertado por um betão de elevado desempenho na reação de hidratação do cimento. Este estudo permitirá um controlo de qualidade dos betões de alto desempenho para diferentes misturas, assim como uma previsão do efeito que certas adições ou diferentes proporções de constituintes poderão ter no comportamento térmico destes. Todos os ensaios laboratoriais foram complementados com ensaios não destrutivos, como o estudo da resistividade e da propagação dos ultrassons de maneira a obter uma melhor interpretação da diferença das propriedades mecânicas entre amostras.

O desenvolvimento prático deste trabalho contou primeiramente com o ensaio de caracterização térmica dos moldes, de maneira a compreender a eficácia térmica destes e permitir uma estimativa da convecção térmica presente. Seguidamente procedeu-se a ensaios de diferentes razões de água-cimento de pastas, com o objetivo de perceber o efeito que a variação da quantidade de cimento tem na produção de calor devido à hidratação do cimento, assim como nas máximas temperaturas verificadas nos provetes. Por último foram realizados ensaios de argamassas de alto desempenho para compreender a influência que adições nas argamassas poderão provocar na reação da hidratação do cimento, e também perceber a variação de comportamento devido à presença de areia fina na mistura.

Por último procedeu-se ao desenvolvimento de modelos numéricos, que graças às capacidades de simulação do processo de hidratação do cimento e da interação com o meio envolvente, de maneira a prever os resultados medidos no molde instrumentado, tais como curvas de temperatura ao longo do tempo, e também permitiram que se gerassem mapas de temperatura.

Paralelamente foi realizado um estudo de desenvolvimento do molde, de maneira a proporcionar maior eficácia térmica, praticabilidade e também um aumento do seu automatismo. Para este fim foi incorporado o uso de um dispositivo eletrónico de baixo custo (Arduino), que através da capacidade de processamento avançada permite a leitura e registo das temperaturas no molde.

Conclui-se que é possível obter valores próximos entre os resultados obtidos por via de ensaios laboratoriais e a modelação numérica, sendo necessário um desenvolvimento futuro de um estudo de calibração da convecção térmica assim como um estudo num calorímetro adiabático de pastas e argamassas para que seja feita uma melhor caracterização das taxas de libertação de calor e do efeito que o uso de superplastificante poderá ter na reação de hidratação do cimento

PALAVRAS-CHAVE: BETÃO DE ALTO DESEMPENHO; ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, PRIMEIRAS IDADES, COMPORTAMENTO TÉRMICO, MODELAÇÃO NUMÉRICA

ABSTRACT

The work developed during the present dissertation was performed in conjunction with the project FCT PTDC/ECM/122446/2010 Betofibra – High performance concrete reinforced with fibers in innovative solutions: conception, characterization and quality control carried out in the investigation unit LABEST on the Department of Civil Engineering of FEUP.

The evolution of civil construction as led to the development of concretes with superior resistances that utilize large quantities of cement. This cement chemically reacts with the water leading to an exothermic reaction which, combined with the posterior cooling, generates in the concrete geometrical deformations which can result in premature cracks in the structures.

The main objective of this dissertation is the comprehension of the thermic behavior in the first ages, which is up to 48 hours, of high performance concretes. Through the comparison of the obtained results in laboratory tests and numerical models, a study was conducted in the comprehension of the expected heat to be released by a high performance concrete during the hydration reaction of the cement. This study will allow a quality control over high performance concretes for different mixtures, as well as a forecast of the effect that certain additions or different proportions of the constituents could have on the thermic behavior of these. All laboratory tests were complemented with non-destructive tests, like the study of the resistance and propagation of ultrasounds in order to obtain a better interpretation of the difference in the mechanical properties of the samples.

The practical development of this work counted first with the test of thermal characterization of the molds, in order to understand the thermal efficiency of these and allow an estimate of the present thermal convection. Afterwards it was proceeded with tests of different water/cement pastes ratios, as a way of understanding the effect that the variation in the quantity of cement has in the production of heat due to the hydration of the cement, as well as the maximum temperatures verified in the samples. Lastly were performed high performance mortars tests to further comprehend the influence that additions to the mortars could cause in the hydration reaction of the cement, and also to realize the variation in the behavior due to the presence of fine sand in the mixture.

Finally was proceeded the development of numerical models, thanks to the capabilities of simulation of the hydration process of the cement and the interaction with the environment, in a way to provide approximate results measured in the instrumented mold, such as temperature curves over time, and also made it possible to generate maps of temperatures.

At the same time a study of mold development was conducted so as to provide higher thermal efficiency and practicability, but also the interest of increasing its operator, has been embedded using a low-cost electronic device (Arduino), which by advanced processing capacity allows the reading and recording of temperatures in the mold.

Was possible to conclude that it is possible to obtain similar values between the results obtained through laboratory testing and numerical modeling, being necessary a further development of a calibration study of thermal convection, as well as a study on an adiabatic calorimeter of pastes and mortars for better characterization of the heat release rates and the effect that the use of superplasticizer may have on the hydration reaction of cement.

KEY-WORDS: HIGH PERFORMANCE CONCRETE; NON-DESTRUCTIVE TESTS, EARLY AGES, THERMAL BEHAVIOR, NUMERICAL MODELLING

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES.....	1
2.1. PRIMEIRAS IDADES E LIBERTAÇÃO DE CALOR	1
2.1.1. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA.....	5
2.1.2. CALOR ESPECÍFICO	6
2.1.3. CONVECÇÃO E RADIAÇÃO	6
2.1.4. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	9
2.2. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	11
2.2.1. ASPETOS GERAIS	11
2.2.2. ENSAIO DE ULTRASSONS.....	12
2.2.3. RESISTIVIDADE	19
3 MOLDE INSTRUMENTADO.....	27
3.1. ASPETOS GERAIS.....	27
3.2. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES	27
3.3. ESTUDOS DO MOLDE	29
3.3.1. TEMPERATURA	29
3.3.2. ULTRASSONS.....	29
3.3.3. RESISTIVIDADE	30
3.4. INSTRUMENTAÇÃO	32
3.4.1. TICO - INSTRUMENTO ULTRASSÓNICO DA <i>PROCEQ</i>	32
3.4.2. RTD (<i>RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR</i>).....	34
3.4.3. GERADOR DE SINAL DA <i>KEITHLEY</i>	35
3.4.4. DATATAKER DT 505	35
3.4.5. <i>ARDUINO</i>	36
3.4.6. SENSOR DE TEMPERATURA LM35	37

3.4.7. DHT11 <i>DIGITAL HUMIDITY</i>	38
3.5. DESENVOLVIMENTO DE NOVO MOLDE	38
3.5.1. NOVA GEOMETRIA.....	39
3.5.2. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE DE FORMA AUTOMÁTICA.....	41
4 ENSAIOS	45
4.1. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO MOLDE.....	45
4.2. ENSAIOS DE RAZÃO DE ÁGUA CIMENTO DE PASTAS	49
4.2.1. OBJETIVOS	49
4.2.2. TIPOS DE MISTURA E METODOLOGIA DE ENSAIO	50
4.2.3. RESULTADOS.....	53
4.3. ENSAIOS DE ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO.....	58
4.3.1. OBJETIVOS	58
4.3.2. TIPOS DE MISTURA E METODOLOGIA DE ENSAIO	59
4.3.3. RESULTADOS.....	61
5 MODELAÇÃO NUMÉRICA	67
5.1. ASPETOS GERAIS	67
5.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO	68
5.3. RESULTADOS	74
5.3.1. CALIBRAÇÃO DA CONVECÇÃO.....	74
5.3.2. MODELAÇÃO DE DIFERENTES RAZÕES DE ÁGUA CIMENTO DE PASTAS.....	78
5.3.3. MODELAÇÃO DA ARGAMASSA DE REFERÊNCIA.....	90
6 CONCLUSÃO E PERSPETIVAS FUTURAS.....	95
6.1. CONCLUSÃO.....	95
6.2. PERSPETIVAS FUTURAS	96
BIBLIOGRAFIA	97
ANEXOS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Períodos de libertação de calor durante a hidratação do cimento (Maekawa, K. [et al.], 1999)	1
Figura 2.2 – Processo de Hidratação (Azenha, M.Â.D., 2004)	2
Figura 2.3 – Mecanismos de transmissão de calor (Azenha, M.Â.D., 2004)	3
Figura 2.4 – Volume infinitesimal elementar de matéria (Azenha, M.Â.D., 2004)	4
Figura 2.5 – Taxa de geração de calor para CEM I 42,5 R (Ferreira, D.C.S., 2009)	9
Figura 2.6– Calor gerado acumulado para CEM I 42,5 R (Ferreira, D.C.S., 2009)	9
Figura 2.7 – Evolução do grau de hidratação (Ferreira, D.C.S., 2009)	10
Figura 2.8 - Função $f(\alpha)$ para CEM I 42,5R (Ferreira, D.C.S., 2009)	11
Figura 2.9 - Método direto (Catalogue, P., 2007)	13
Figura 2.10 - Método semidireto (Catalogue, P., 2007)	13
Figura 2.11 - Método indireto (Catalogue, P., 2007)	14
Figura 2.12 - Resistividades dos materiais (Silva, P.C.F., 2011)	20
Figura 2.13 - Exemplo do método dos 2 elétrodo (P. C. Silva, R.M.F., H. Figueiras, 2012)	21
Figura 2.14 – Método dos 4 Elétrodo (Sonda de Wenner) (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004)	22
Figura 2.15 – Método dos 4 elétrodo (John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006)	22
Figura 2.16 - Método de 1 elétrodo	23
Figura 2.17 - Relação de Grau de Saturação com a Resistividade (Silva, P.C.F., 2011)	24
Figura 2.18 – Razão água cimento (Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003)	24
Figura 2.19 – Teor de Humidade (Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003)	25
Figura 2.20 – Relação entre Tipo de Cimento e Resistividade (Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003)	25
Figura 3.1 – Detalhe da chapa metálica e das malhas metálicas adotadas	28
Figura 3.2 – Molde Instrumentado HC2A	29
Figura 3.3 – Face com orifício para leitura de ultrassons	30
Figura 3.4 – Aplicação das redes metálicas	31
Figura 3.5 – Molde fechado com isolamento nos orifícios	31
Figura 3.6 – Multímetro da Keithley	32
Figura 3.7 – Multímetro da Tektronix	32
Figura 3.8 – TICO da Proceq	32
Figura 3.9 – Medição com uso do TICO (Catalogue, P., 2007)	33
Figura 3.10 – Gráfico Resistência-Temperatura (Modificada) (Ziehl, 2013)	34
Figura 3.11 – Gerador de Sinal 3390 da Keithley (Keithley, 2013)	35
Figura 3.12 – Arduino	36
Figura 3.13 – Sensor de Temperatura LM35	37
Figura 3.14 – Sensor de Humidade e Temperatura DHT11	38
Figura 3.15 – Molde metálico em “L”	39
Figura 3.16 – Geometria em “L”	40
Figura 3.17 – Lateral com presença de reentrâncias	40
Figura 3.18 – Base com presença de reentrâncias	40
Figura 3.19 – Fechos Metálicos	40
Figura 3.20 – Tampa com proteção do Arduino (Vista superior)	41
Figura 3.21 – Tampa com proteção do Arduino (Vista frente)	41
Figura 3.22 – Arduino acoplado com sensores	42
Figura 3.23 – Ecrã LCD de 16 pinos	43
Figura 3.24 – a) Registo de dados em ficheiro .csv ; b) Registo de dados em Excel	43
Figura 4.1 – Aquecedor de Água	45
Figura 4.2 – Computador Portátil	45
Figura 4.3 – DataTaker DT 505	45
Figura 4.4 - Disposição dos vários elementos	45
Figura 4.5 – Cinco Moldes	46
Figura 4.6 - Molde HCS (série S1) com isolamento na zona das malhas metálicas	47
Figura 4.7 - Molde HCC (série S2) sem tampa	47
Figura 4.8 - Molde HCA (série S3) com isolamento de papel na tampa	47
Figura 4.9 - Molde HCB com isolamento de papel na tampa e nas aberturas junto às chapas metálicas	47

Figura 4.10 – Gráfico de Variação de Temperatura	48
Figura 4.11 – Gráfico de Comparação de comportamentos	49
Figura 4.12 – Mini-cone de Kantro para Ensaio de Espalhamento	51
Figura 4.13 – Trabalhabilidade Adequada	52
Figura 4.14 – Trabalhabilidade inadequada (Caetano, H.F.d.S., 2013)	52
Figura 4.15 – Ensaio de Espalhamento com uso de Mini-cone de Kantro	52
Figura 4.16 – Enchimento dos Moldes	53
Figura 4.17 – Enchimento dos moldes	53
Figura 4.18 - Variação das Temperaturas dos Moldes	54
Figura 4.19 – Variação de Resistividades	55
Figura 4.20 – Variação de Ultrassons	56
Figura 4.21 – Ensaio de Ultrassons ao longo do tempo (Caetano, H.F.d.S., 2013)	56
Figura 4.22 – Relação entre Razão Água Cimento e Temperatura Máxima	57
Figura 4.23 – Relação entre Razão de Água Cimento e Integral de Curvas de Temperatura	58
Figura 4.24 – Ensaio de Espalhamento de Argamassas	61
Figura 4.25 – Evolução da Temperatura ao longo do tempo	62
Figura 4.26 – Evolução da Resistividade	64
Figura 4.27 – Evolução da Velocidade de Ultrassons	65
Figura 5.1 – Malha de Elementos Finitos	68
Figura 5.2 – Localização do Sensor de Temperatura	69
Figura 5.3 – Efeitos da presença de um corpo metálico em contacto com o betão e o exterior (Azenha, M., 2009)	75
Figura 5.4 – Variação da Temperatura da Água	75
Figura 5.5 – Comparação entre Temperatura registada no molde e no DIANA	77
Figura 5.6 – Comparação decréscimo de temperatura	78
Figura 5.7 – Modelação de $A/C=0,3$ para convecção teórica de 3,75	79
Figura 5.8 – Modelação de $A/C=0,3$ para convecção calibrada de 6,2	80
Figura 5.9 – Mapa de variação de temperatura para convecção calibrada de 6,2, $A/C=0,3$ e Cimento A	81
Figura 5.10 – Modelação para $A/C=0,4$	82
Figura 5.11 – Modelação corrigida para $A/C=0,4$	83
Figura 5.12 – Modelação para $A/C=0,5$	84
Figura 5.13 – Modelação corrigida para $A/C=0,5$	85
Figura 5.14 – Modelação para $A/C=0,6$	86
Figura 5.15 – Modelação corrigida para $A/C=0,6$	87
Figura 5.16 – Comparação de Resultados de Calor Total Gerado para Cimento A	89
Figura 5.17 – Comparação de Resultados de Temperatura Máxima para Cimento A	89
Figura 5.18 – Relação entre Razão Água Cimento e Temperatura Máxima	89
Figura 5.19 – Modelação da Argamassa de Referência	91
Figura 5.20 – Diferença de Condições de temperatura Iniciais	92
Figura 5.21 – Diferença de temperatura entre Pasta e Argamassa	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Condutibilidade térmica em função dos agregados.....	6
Tabela 2.2 - Correções da Velocidade de Impulso devido a Variações de Temperatura	16
Tabela 2.3 – Distância entre Transdutores	17
Tabela 2.4 – Aresta mínima para Frequência do Transdutor	17
Tabela 2.5 – Resistividade elétrica para diferentes agregados	26
Tabela 3.1 – Especificações do TICO (Catologue, P., 2007)	33
Tabela 3.2 – Características do Arduino.....	36
Tabela 3.3 – Características do sensor DHT11 (D-Robotics, 2010).....	38
Tabela 4.1 – Composições das Pastas.....	50
Tabela 4.2 – Ensaio de Espalhamento	52
Tabela 4.3 – Data e Hora de Amassadura e Entrada da pasta no Molde	53
Tabela 4.4 – Valores Característicos das Curvas de Temperatura	54
Tabela 4.5 – Valores máximos de Resistividade medidos	55
Tabela 4.6 – Resumo dos resultados	57
Tabela 4.7 – Constituição da Argamassa com Sílica de Fumo	59
Tabela 4.8 – Constituição da Argamassa com Metacaulino	59
Tabela 4.9 – Constituição da Argamassa com Pó de Vidro	59
Tabela 4.10 – Constituição da Argamassa de Referência.....	60
Tabela 4.11 – Ensaio de Espalhamento	61
Tabela 4.12 – Razões de Água Cimento	62
Tabela 4.13 - Valores Característicos das Curvas de Temperatura.....	63
Tabela 4.14 – Comparação entre A/C =0,3 e Argamassa de Referência	63
Tabela 4.15 – Valores máximos de Resistividade medidos às 48 horas.	65
Tabela 4.16 – Resumo dos resultados	65
Tabela 5.1 – Valores de Condutibilidade Térmica (W/mK) (Azenha, M.Â.D., 2004)	70
Tabela 5.2 – Valores de Calor Específico (J/kg.K) (Azenha, M.Â.D., 2004)	71
Tabela 5.3 – Taxa de Geração de Calor normalizada em função do tipo de cimento e grau de hidratação (α_T).....	72
Tabela 5.4 – Calor Total Gerado para Cimento A (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)	72
Tabela 5.5 – Calor Total Gerado para Cimento B (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)	72
Tabela 5.6 – Taxa máxima de geração de calor para Cimento A (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)	73
Tabela 5.7 – Taxa máxima de geração de calor para Cimento B (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)	73
Tabela 5.8 – Variáveis Introduzidas no programa DIANA	76
Tabela 5.9 – Variáveis constantes no estudo da calibração da convecção	76
Tabela 5.10 – Comparação entre Valores Medidos e Aproximados	77
Tabela 5.11 – Cimento A e Cimento B para convecção teórica de 3,75 e A/C=0,3.....	78
Tabela 5.12 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,3 e Convecção de 3,75.....	79
Tabela 5.13 – Cimento A e Cimento B para convecção calibrada de 6,2 e A/C=0,3	80
Tabela 5.14 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,3 e Convecção de 6,2	81
Tabela 5.15 – Cimento A e Cimento B para A/C=0,4	82
Tabela 5.16 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,4	82
Tabela 5.17 – Iterações da Quantidade de cimento para A/C=0,4.....	83
Tabela 5.18 – Cimento A e Cimento B para A/C=0,5	84
Tabela 5.19 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,5	85
Tabela 5.20 – Iterações da Quantidade de cimento para A/C=0,5.....	85
Tabela 5.21 – Cimento A e Cimento B para A/C=0,6	86
Tabela 5.22 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,6	87
Tabela 5.23 – Iterações da Quantidade de cimento para A/C=0,6.....	87
Tabela 5.24 – Resumo de Resultados para Cimento A.....	90
Tabela 5.25 – Resumo de Resultados para Cimento B.....	90
Tabela 5.26 – Características da Argamassa de Referência	91
Tabela 5.27 – Variação de Valores de Temperatura Máxima da Argamassa de Referência	91
Tabela 5.28 – Características da Argamassa de Referência em Condições iguais à do ensaio das Pastas.....	92
Tabela 5.29 – Variação de Temperatura para diferentes condições iniciais	93

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- $\dot{E}_g$ – Taxa de geração de energia (W);
- $\dot{E}_{in}$ – Taxa de entrada de energia (W);
- $\dot{E}_{out}$ – Taxa de saída de energia (W);
- $\dot{E}_{st}$ – Taxa de armazenamento de energia (W);
- $\dot{Q}_{m\acute{a}x}$ – Taxa máxima de geração de calor (kJ/kg)
- $\dot{Q}$ – Taxa de geração de calor (kJ/kg)
- $\dot{Q}$ – Taxa de geração de energia por unidade de volume no meio (W/m³);
- T_{∞} - Temperatura do fluido (K)
- q_x^n – Fluxo de calor através de uma superfície por unidade de área (W/m²)
- A – Área (m²).
- a – Distância entre elétrodos (cm).
- A_T – Constante de proporcionalidade
- c_{agg} – Calor específico dos inertes (J/kg.K);
- c_{bindW} = 0,2
- c_c – Calor específico do betão (J/kg.K);
- c_{cem} – Calor específico do cimento (J/kg.K);
- c_w – Calor específico da água (J/kg.K);
- E – Fluxo de energia total emitido (W/m²);
- E_a - Energia de ativação aparente do betão (J/mol)
- E_{bal} – Energia de balanço (W/m²).
- h₁ – Coeficiente de convecção-radiação original (W/m².K);
- h_{conv} - Coeficiente de convecção (W/m².K);
- h_{eq} – Coeficiente de convecção-radiação equivalente (W/m².K);
- h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m².K).
- I – Intensidade Elétrica (mA);
- K – Condutibilidade térmica (W/m.K)
- k – Constante Geométrica (cm);
- k_{agg} – Condutibilidade térmica dos agregados (W/mK);
- k_c – Condutibilidade térmica (W/m.K);
- k_{cem} – Condutibilidade térmica do cimento (W/mK);
- k_i – Condutibilidade térmica do material i;
- k_w – Condutibilidade térmica da água (W/mK);

L_i – Espessura (m)

q'' – Fluxo convectivo de calor por unidade de área (W/m²);

q_x - Fluxo de calor (W)

R - Constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)

R – Resistência Elétrica (k Ω);

ρ_c – Massa Volúmica da mistura.

T – Temperatura (K)

t – Tempo (s).

T_s – Temperatura da superfície (K)

V – Diferença de Potencial (V);

W_{agg} – Massa de inertes na mistura por unidade de volume (Kg/m³);

W_{cem} – Massa de cimento na mistura por unidade de volume (Kg/m³);

W_w – Massa de água na mistura por unidade de volume (Kg/m³);

x – coordenada (m)

α – Grau de hidratação do cimento.

ρ – Resistividade Elétrica (k Ω cm);

σ – Constante de Stefan-Boltzmann (5.67x10⁻⁸ W/m²K⁻⁴);

$f(\alpha_T)$ – Taxa de geração de calor normalizada

v – velocidade do vento (m/s)

ε – Emissividade ($0 < \varepsilon < 1$);

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O betão é um dos materiais mais usados na construção civil, normalmente em conjunto com o aço, sendo a sua associação, o betão armado, o material estrutural mais usado nas obras de engenharia civil (Neville, A.M., 1995). Mas ao contrário do aço que é produzido sob condições controladas, com certificados de qualidade caracterizados em laboratório, o controlo de qualidade do betão caracteriza-se por um maior grau de complexidade tendo em conta que as suas características se alteram rapidamente ao longo do tempo independentemente da sua produção em ambientes próprios e sob controlo rigoroso de qualidade. Como se trata de um material heterogéneo, o controlo dos vários constituintes é de elevada importância já que estes vão reagindo ao longo do tempo e, por sua vez, alterando as suas propriedades. Para o betão poder desempenhar corretamente as suas funções, tem que ter três importantes características: uma boa trabalhabilidade no estado fresco e elevada resistência e durabilidade no estado endurecido.

A evolução da construção civil obrigou a que fossem desenvolvidos betões com resistências elevadas e, devido a pressões económicas, a sua utilização tornou-se generalizada. Contrariamente ao que se poderia pensar, um betão mais resistente não é um betão com durabilidade superior; na realidade, os betões de alto desempenho utilizam grandes quantidades de cimento, cimento esse que reage quimicamente com a água levando a uma reação exotérmica que, combinada com o arrefecimento posterior, gera no betão deformações que podem resultar em fissuração precoce das estruturas.

Para prevenir a fissuração foi necessário o desenvolvimento de novas técnicas tais como utilização de cimentos modificados, adições, adjuvantes, fibras, controlo das condições de cura, como por exemplo, a temperatura.

O objetivo desta dissertação é a calibração de um modelo numérico do comportamento de um molde instrumentado em laboratório, que permita uma compreensão do calor expectável libertado por um betão de elevado desempenho na reação de hidratação do cimento nas primeiras 48 horas. Graças à experiência obtida pelos ensaios desenvolvidos em laboratório de diferentes misturas de pastas e argamassas, foi possível obter informações importantes para a comparação com os resultados obtidos na modelação numérica.

A combinação da experiência obtida nos ensaios e as inúmeras capacidades da modelação numérica permitirá um controlo de qualidade dos betões de alto desempenho para diferentes misturas, assim como uma previsão do efeito que certas adições ou diferentes proporções de constituintes poderão ter no comportamento térmico destes.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A organização da presente dissertação é feita em seis capítulos em que o primeiro dos quais é a presente introdução no qual se apresenta os temas e motivações a serem desenvolvidos ao longo do trabalho.

O **Capítulo 2** inicia-se com a descrição do processo de hidratação e o seu comportamento nas primeiras idades, desenvolvendo-se o contexto teórico-prático das características materiais como a transmissão de calor e a caracterização do carácter evolutivo de algumas propriedades térmicas do betão. No mesmo capítulo é feita uma descrição dos ensaios não destrutivos, dando especial importância ao ensaio da resistividade e ao ensaio de ultrassons.

No **Capítulo 3** é apresentado o molde instrumentado utilizado para a realização dos ensaios através de uma descrição dos componentes, a instrumentação necessária e as suas potencialidades de leitura dos estudos térmico, ultrassons e de resistividade. No final do capítulo é realizado um estudo de desenvolvimento do molde.

O **Capítulo 4** apresenta uma descrição do processo de amassadura das várias misturas e a leitura e recolha de dados por parte dos ensaios realizados nos moldes instrumentados. O estudo é iniciado com um ensaio de caracterização térmica do molde, sendo seguido pelos ensaios de razão de água-cimento de pastas e os ensaios de argamassas de alto desempenho

No **Capítulo 5** é efetuada a modelação numérica e aquisição de resultados com base nas informações obtidos nos ensaios procedendo-se a uma comparação dos resultados obtidos.

No **Capítulo 6** é apresentada uma síntese dos resultados obtidos e respetivas conclusões. São sugeridos desenvolvimentos futuros para continuidade do trabalho realizado na presente dissertação.

2

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES

2.1. PRIMEIRAS IDADES E LIBERTAÇÃO DE CALOR

O desenvolvimento das propriedades físicas do betão nas primeiras idades advém da reação de hidratação provocada pela adição de água ao cimento. Esta reação é responsável pelo desenvolvimento da microestrutura resistente e das propriedades mecânicas do betão. As reações químicas associadas ao processo de hidratação do cimento caracterizam-se por uma grande libertação de energia, denominado por calor de hidratação.

Este comportamento exotérmico gera uma expansão volumétrica seguida de uma contração do betão que, quando sujeito a restrições externas ou internas, podem provocar fissuração prematura. Esta fissuração resulta em problemas de durabilidade devido à suscetibilidade de degradação do betão.

No presente capítulo será feita uma descrição dos fenómenos que descrevem o comportamento do betão nas primeiras idades a partir da análise do campo térmico do betão e da natureza exotérmica e termicamente ativada das reações químicas envolvidas no processo de hidratação.

O processo de hidratação do cimento pode ser dividido em três períodos (período inicial, período intermédio e período tardio), como representados na Figura 2.1:

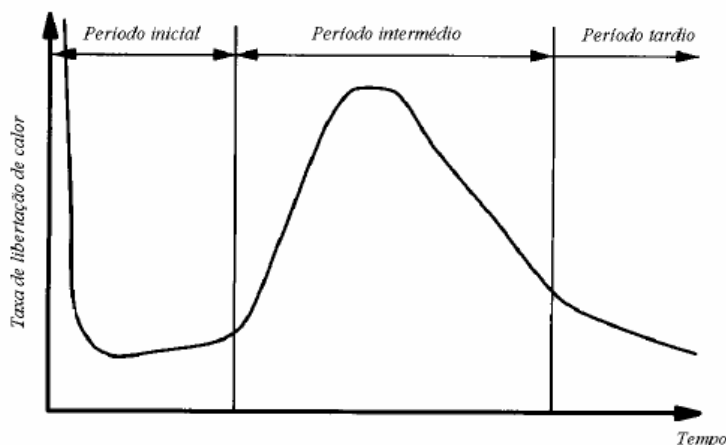


Figura 2.1 - Períodos de libertação de calor durante a hidratação do cimento (Maekawa, K. [et al.], 1999)

O período inicial dá-se com a mistura da água com o cimento, em que as reações entre os iões superficiais das partículas do cimento com a água, durante apenas alguns minutos, geram grandes produções de calor. Este período é seguido por uma fase de inatividade aparente devido à formação de uma camada protetora em redor das partículas de cimento, que pode durar até 5 horas.

Após a fase de inatividade, quando a camada protetora é eliminada, inicia-se o período intermédio dando continuação à reação da hidratação. Neste período ocorre a expansão das partículas de cimento,

aparecem fibras alongadas e assiste-se à formação do esqueleto básico, criando-se produtos de hidratação instáveis. Este período é caracterizado pela sua elevada reatividade até ser atingido um pico de geração de calor, seguido de uma fase de desaceleração secundária à formação de uma camada envolvente das partículas de cimento; isto limita o acesso da água que fica então impossibilitada de reagir com os reagentes não hidratados. A duração do período intermédio pode variar entre as 24 e 48 horas, dependendo da taxa de difusão dos iões.

A fase de formação do esqueleto sólido, denominada por período tardio, é caracterizada por velocidades de reação de hidratação bastante inferiores, devido ao progressivo espessamento da camada de produtos de hidratação, resultando na formação de produtos de hidratação estáveis, que ocupam o espaço entre as fibras existentes.

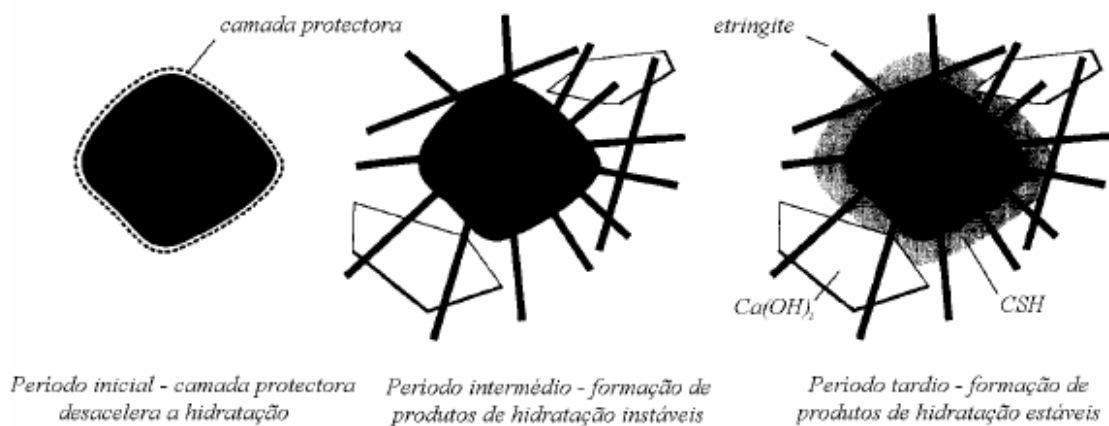


Figura 2.2 – Processo de Hidratação (Azenha, M.Â.D., 2004)

Para se proceder a uma análise do comportamento térmico do betão é necessária a identificação dos fenómenos e parâmetros que o caracterizam. Este comportamento depende da análise da geração de calor devido à hidratação do cimento e da caracterização física dos materiais responsáveis pelas condições de transferências de calor.

A transferência de calor é consequência da diferença de temperaturas entre um ou vários meios, sendo realizada segundo três mecanismos que não se podem considerar completamente independentes pela existência de interações entre si. Por simplificação, procede-se à análise em separado. As naturezas de transmissão são:

- Condução
- Convecção
- Radiação

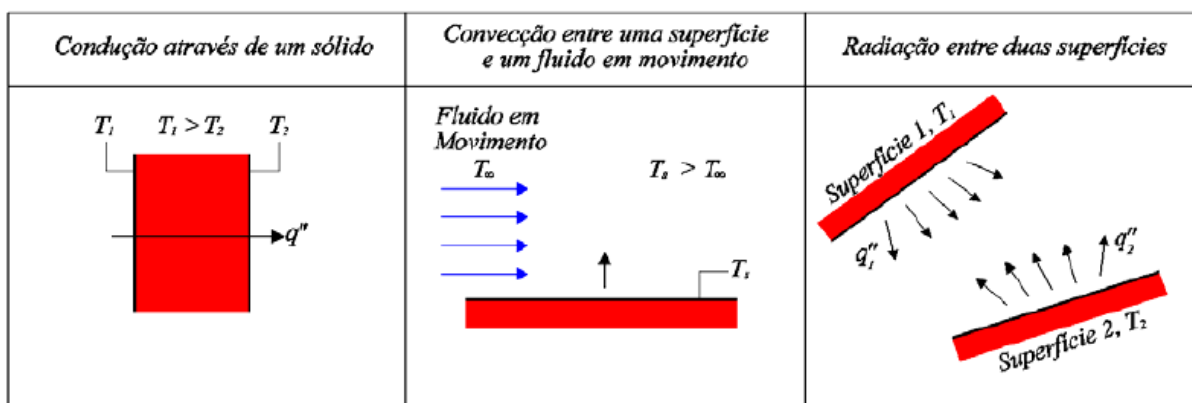


Figura 2.3 – Mecanismos de transmissão de calor (Azenha, M.Â.D., 2004)

O processo de transferência de calor por via da condução, típica entre sólidos, é feita pelo movimento aleatório de moléculas ou de eletrões livres. A condução de calor pode acontecer em regime estacionário ou em regime variável, em que a temperatura varia no tempo.

A equação de Fourier, baseada nos princípios enunciados pela lei do mesmo nome, responsável pelo cálculo da condução de calor em regime estacionário, para um caso unidimensional apresenta a forma:

$$q_x^n = \frac{q_x}{A} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

Em que:

q_x^n – Fluxo de calor através de uma superfície por unidade de área (W/m²)

q_x - Fluxo de calor (W)

A – Área atravessada pelo fluxo de calor (m²)

k – Condutibilidade térmica (W/m.K)

T – Temperatura (K)

x – coordenada (m)

De acordo com a equação (2.1), a direção do fluxo de calor é perpendicular à superfície isotérmica; o sinal negativo da equação relaciona-se com o facto de o fluxo seguir o sentido das temperaturas decrescentes. (Azenha, M.Â.D., 2004)

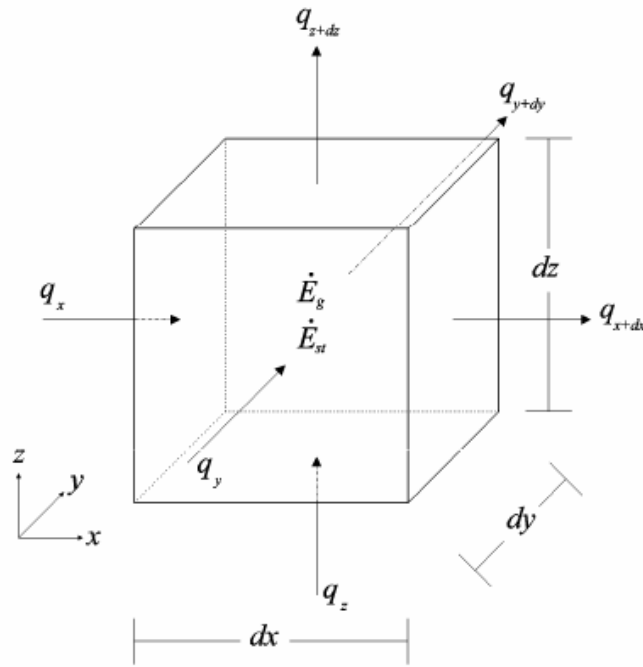


Figura 2.4 – Volume infinitesimal elementar de matéria (Azenha, M.Â.D., 2004)

A condução em regime variável, na qual a distribuição da temperatura varia com o tempo até que se atinja o equilíbrio, é descrita pela lei de Fourier. A equação de balanço de energia permite determinar o campo de temperaturas num meio. Considerando um volume infinitesimal elementar como o representado na Figura 2.4 – Volume infinitesimal elementar de matéria (Azenha, M.Â.D., 2004), em que na condução de calor através das faces da matéria infinitesimal, em direções perpendiculares a estas, os fluxos de calor nas faces opostas, podem ser representados pela expansão série de Taylor, segundo:

$$q_{x+\partial x} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \partial x \quad q_{y+\partial y} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \partial y \quad q_{z+\partial z} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \partial z \quad (2.2)$$

Segundo a Primeira Lei da Termodinâmica num sistema fechado:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.3)$$

$$\dot{E}_g = \dot{Q} \, dx \, dy \, dz \quad (2.4)$$

$$\dot{E}_{st} = \rho \, c \, \frac{\partial T}{\partial t} \, dx \, dy \, dz \quad (2.5)$$

Em que:

$\dot{E}_{in}$ – Taxa de entrada de energia (W);

$\dot{E}_{out}$ – Taxa de saída de energia (W);

$\dot{E}_g$ – Taxa de geração de energia (W);

$\dot{E}_{st}$ – Taxa de armazenamento de energia (W);

$\dot{Q}$ – Taxa de geração de energia por unidade de volume no meio (W/m³);

t – Tempo (s).

A partir das fórmulas anteriores é possível obter a forma geral da equação de Fourier, da qual se pode obter a distribuição de temperatura $T_{(x,y,z,t)}$:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

Para valores constantes de condutibilidade térmica, obtém-se:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = \rho c \dot{T} \quad (2.7)$$

Devido ao carácter heterogéneo do betão, as propriedades térmicas são muito influenciadas pelas propriedades e proporções dos seus constituintes.

2.1.1. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A condutibilidade térmica do betão é influenciada pela idade, razão água-cimento, tipos de adições, tipo e volume de agregados, temperatura e saturação, assumindo como valores correntes 1,2 a 3 W/m.K . (Azenha, M.Â.D., 2004, Lura, P. and Breugel, K.v., 2001)

O cálculo analítico da condutibilidade térmica do betão (k_c) pode ser realizado a partir de uma estimação do comportamento compósito dos seus constituintes, a partir da seguinte equação:

$$k_c = \frac{W_{cem} k_{cem} + (W_{sand} + W_{grav}) k_{agg} + W_w k_w}{\rho_c} \quad (2.8)$$

Em que:

k_c – Condutibilidade térmica (W/m.K);

W_{cem} – Massa de cimento na mistura por unidade de volume (Kg/m³);

W_{agg} – Massa de inertes na mistura por unidade de volume (Kg/m³);

W_w – Massa de água na mistura por unidade de volume (Kg/m³);

k_{cem} – Condutibilidade térmica do cimento (W/mK);

k_{agg} – Condutibilidade térmica dos agregados (W/mK);

k_w – Condutibilidade térmica da água (W/mK);

ρ_c – Massa Volúmica da mistura.

Esta estimação proposta pelo US Bureau of Reclamation na década de 1940, prevê desvios máximos de 7%, relativamente aos valores obtidos pela via experimental. Os valores da condutibilidade térmica em função dos agregados são dadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Condutibilidade térmica em função dos agregados

Tipo de Agregado	Condutibilidade térmica do betão (W/m°C)
Quartzito	3.5
Dolomite	3.2
Calcário	2.6 – 3.3
Granito	2.6 – 2.7
Riolito	2.2
Basalto	1.9 – 2.2

2.1.2. CALOR ESPECÍFICO

O calor específico (c) corresponde à quantidade de calor que é necessário fornecer a uma unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura em um grau, sendo exprimido em J/(Kg.K). Os valores usuais para betões endurecidos variam entre os 800 e 1170 J/(Kg.K).

Tal como a condutibilidade térmica, o calor específico também é muito influenciado por várias propriedades como o tipo, volume e rácio de agregados, a razão água-cimento e temperatura.

Segundo (Azenha, M.Â.D., 2004, Lura, P. and Breugel, K.v., 2001) a determinação analítica do calor específico pode ser realizada a partir da ponderação dos calores específicos dos vários constituintes, através de:

$$c_c = \frac{W_{cem} c_{cem} + (W_{sand} + W_{grav}) c_{agg} + W_w c_w - c_{bindW} W_{cem} \alpha c_w}{p_c} \quad (2.9)$$

Em que:

$$c_{bindW} = 0,2$$

c_c – Calor específico do betão (J/kg.K);

c_w – Calor específico da água (J/kg.K);

c_{cem} – Calor específico do cimento (J/kg.K);

c_{agg} – Calor específico dos inertes (J/kg.K);

α – Grau de hidratação do cimento.

Na expressão (2.9) encontra-se uma parcela negativa, relativa ao facto de o calor específico da água presente no cimento hidratado na verdade ser metade do verificado em água livre.

2.1.3. CONVECÇÃO E RADIAÇÃO

Citando (Ferreira, D.C.S., 2009): "No que diz respeito às condições fronteira do problema térmico, os fenómenos de convecção e radiação são importantes na análise do comportamento do betão nas primeiras idades."

A transferência de calor ocorrida entre uma superfície e um fluido em movimento, na existência de um diferencial de temperatura entre eles, denomina-se de convecção. Este fenómeno é bastante complexo, por depender da geometria da superfície de contacto e as condições de fluxo de calor, mas também

depende das propriedades do fluido como a densidade, viscosidade, condutibilidade térmica e o calor específico.

A convecção pode ser dividida em quatro tipos:

- Convecção forçada (provocada por meios externos como ventoinhas, vento, etc.);
- Convecção livre (fluxo provocado apenas pelas diferenças de temperatura e densidade);
- Convecção por ebulição;
- Convecção por condensação.

Na presente dissertação apenas se procederá ao estudo da convecção forçada e livre, por no estudo de peças de betão em contacto com o ar, apenas existirem condições de atuação do vento e diferenças de temperatura entre materiais.

O fenómeno de convecção é caracterizado pela seguinte equação baseada na Lei de Newton:

$$q'' = h_c(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

Em que:

q'' – Fluxo convectivo de calor por unidade de área (W/m²);

h_c - Coeficiente de convecção (W/m².K);

T_s – Temperatura da superfície;

T_∞ - Temperatura do fluido.

O coeficiente de convecção (h_c) depende da geometria, área de escoamento, natureza do movimento do fluido e das propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido. No processo de cálculo do fluxo de convecção, este coeficiente pode ser estimado segundo a formulação empírica referenciada em (Jonasson, J.-E., 1994), de acordo com a velocidade do vento:

$$h_c = \begin{cases} 5.6 + 3.95 v & \text{se } v \leq 5 \text{ m/s} \\ 7.6 v^{0.78} & \text{se } v > 5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (2.11)$$

Em que:

v – velocidade do vento (m/s)

A transferência de calor entre dois corpos a temperaturas diferentes é denominada por radiação. Segundo a Teoria Clássica esta transferência é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas, podendo dar-se na ausência de matéria. Todos os corpos existentes emitem temperatura, mas têm comportamentos diferentes no que toca à absorção e reflexão da energia. As grandezas absorvidade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ) são função do comprimento de onda da radiação incidente e o seu somatório é igual à unidade.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.12)$$

A radiação emitida por um corpo por unidade de área é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.13)$$

Em que:

E – Fluxo de energia total emitido (W/m²);

ε – Emissividade ($0 < \varepsilon < 1$);

σ – Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m²K⁻⁴);

T_s – Temperatura da superfície (K).

A diferença da energia que é emitida e a absorvida pelos corpos vizinhos pode ser calculada através da fórmula seguinte, assumindo dois corpos A e B a diferentes temperaturas:

$$E_{bal} = \varepsilon_A \sigma T_A^4 - \alpha_A \varepsilon_B \sigma T_B^4 \quad (2.14)$$

Em que:

E_{bal} – Energia de balanço (W/m²).

Segundo as fórmulas anteriores o coeficiente de transferência de calor por radiação é dado por:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (2.15)$$

Em que:

h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação (W/m².K).

Segundo Branco, F.A. [et al.] (1992) uma forma alternativa do cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação, para valores habituais de diferença entre a superfície do betão e o meio ambiente (inferior a 20°C), é dada por:

$$h_r = \varepsilon [4.8 + 0.075(T_A + 278.15)] \quad (2.16)$$

Por simplificação combina-se a radiação e a convecção no cálculo das condições fronteira, obtendo-se o coeficiente convecção-radiação, válido em situações de contacto direto entre betão e o ar, segundo a equação seguinte:

$$h_{cr} = h_c + h_r \quad (2.17)$$

A presença de cofragens nos casos de estudo da presente dissertação obriga ao cálculo de um coeficiente de convecção-radiação equivalente. Uma maneira de estimar a combinação da convecção da superfície livre com a condução dos materiais cofrantes advém da analogia com circuitos elétricos, mais precisamente a associação em série de resistências, segundo a equação:

$$h_{eq} = \left(\frac{1}{h_1 A} + \sum_i^n \frac{L_i}{k_i A} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

Em que:

h_{eq} – Coeficiente de convecção-radiação equivalente ($W/m^2.K$);

h_1 – Coeficiente de convecção-radiação original ($W/m^2.K$);

L_i – Espessura (m)

k_i – Condutibilidade térmica do material i;

A – Área (m^2).

2.1.4. HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

Como descrito anteriormente a libertação de calor devido à hidratação do cimento não é constante ao longo do tempo, sendo realizada segundo várias fases (Figura 2.1). Associando também o facto de as reações químicas existentes serem termicamente ativas, faz com que as taxas de geração de calor e de calor gerado acumulado obtenham as seguintes formas como pode ser visto na Figura 2.5 e Figura 2.6.

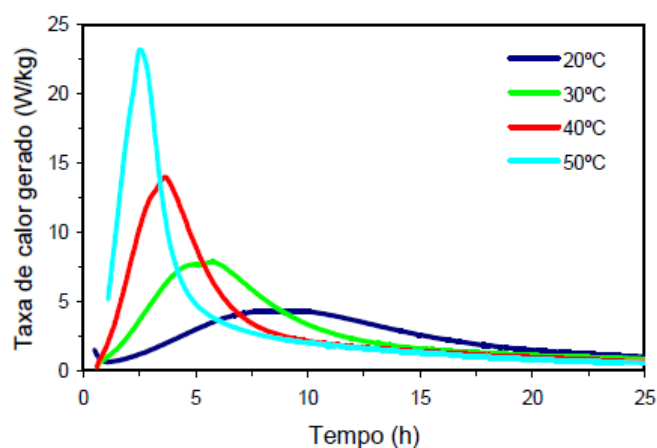


Figura 2.5 – Taxa de geração de calor para CEM I 42,5 R (Ferreira, D.C.S., 2009)

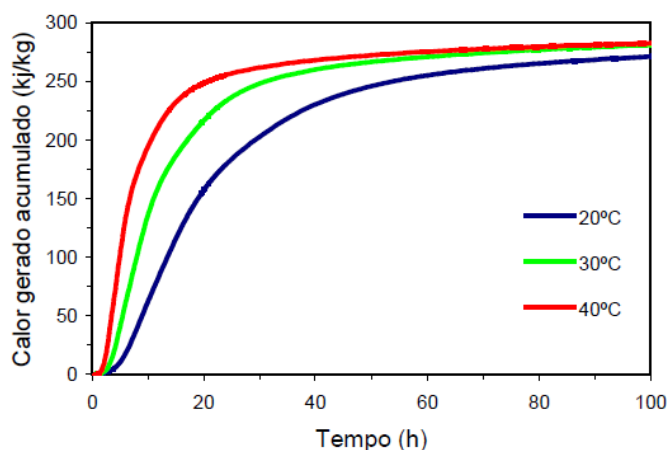


Figura 2.6 – Calor gerado acumulado para CEM I 42,5 R (Ferreira, D.C.S., 2009)

Por interpretação das figuras anteriores, é possível compreender que temperaturas altas levam ao aumento da taxa de geração de calor e consequentemente ao calor gerado acumulado, confirmando então o carácter termicamente ativo do processo de hidratação.

Considerando que o grau de hidratação (α_T) corresponde à razão entre a quantidade de cimento reagido e o cimento total presente na mistura num certo instante. Este fator que varia entre 0 e 1, permite a descrição do desenvolvimento das reações químicas envolvidas na hidratação do cimento. O seu cálculo direto não é possível ser realizado portanto assume-se a relação deste com o grau de geração de calor (α_T), que é definido como a razão entre o calor libertado até um instante t ($Q(t)$) e o calor total libertado (Q_{total}).

$$\alpha_T = \frac{\text{quantidade de cimento reagido no instante } t}{\text{cimento total no instante } t=0}, \quad 0 \text{ a } 1 \quad (2.19)$$

$$\alpha_T = \frac{Q(t)}{Q_{total}}, \quad 0 \text{ a } 1 \quad (2.20)$$

De seguida estão apresentadas as curvas da evolução do grau de hidratação Figura 2.7, que permitem a interpretação de que a reação se dá muito mais rapidamente no início, acabando por assumir um comportamento mais lento no final do processo de hidratação do cimento, como foi descrito no capítulo 2.1.

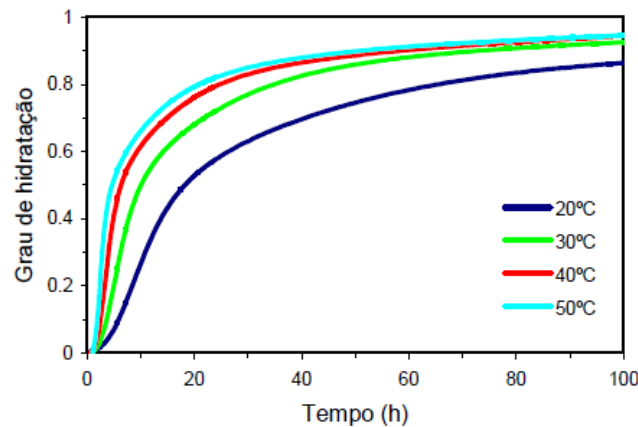


Figura 2.7 – Evolução do grau de hidratação (Ferreira, D.C.S., 2009)

O cálculo da taxa de geração de calor a um certo instante, é baseado na lei de Arrhenius, que conta como variável a temperatura proporcionando o carácter termicamente ativo à taxa de geração de calor. A equação seguinte corresponde ao máximo calor gerado expectável para 1 quilograma de cimento:

$$g(T) = A_T e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.21)$$

Em que:

E_a - Energia de ativação aparente do betão (J/mol)

R - Constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)

T - Temperatura (K)

A_T - Constante de proporcionalidade

A taxa de geração de calor é dada por:

$$\dot{Q} = f(\alpha_T) A_T e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.22)$$

Em que:

$f(\alpha_T)$ – Taxa de geração de calor normalizada

A taxa de geração de calor normalizada corresponde à percentagem de libertação de calor em função do grau de hidratação (Figura 2.8), e obtém-se da seguinte forma:

$$f(\alpha_T) = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{máx}} \quad (2.23)$$

Em que:

$\dot{Q}$ – Taxa de geração de calor (kJ/kg)

$\dot{Q}_{máx}$ – Taxa máxima de geração de calor (kJ/kg)

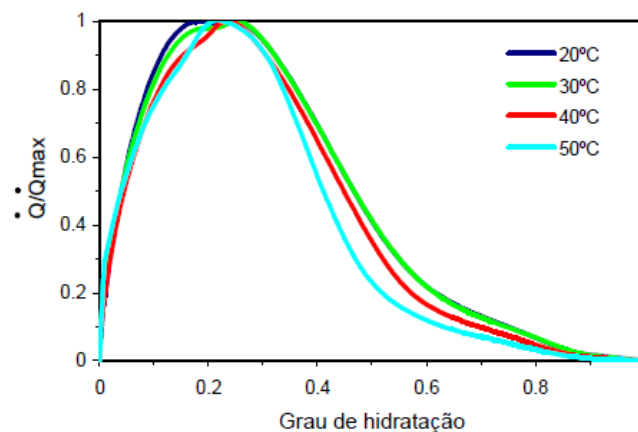


Figura 2.8 - Função $f(\alpha)$ para CEM I 42,5R (Ferreira, D.C.S., 2009)

2.2. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

2.2.1. ASPETOS GERAIS

O uso de técnicas não destrutivas é, há muito, uma prática comum na indústria metalúrgica, por permitir uma observação estrutural das características dos materiais e identificação de patologias e/ou danos que estes possam apresentar, segundo (Neville, A.M.).

Devido à necessidade de obter resultados rápidos *in situ*, sem danos às estruturas ou provetes de betão, é agora também dada uma especial atenção ao desenvolvimento de ensaios não destrutivos do betão. As técnicas não destrutivas permitem estimar as propriedades mecânicas em estruturas novas, com o objetivo de controlar a qualidade dos materiais e da construção.

O aumento do uso de betões de elevado desempenho aumentou a necessidade de aplicação destes novos ensaios pelo longo tempo de execução dos ensaios destrutivos e ausência de correspondência entre a realidade da obra e as condições laboratoriais em que estes são executados.

As características do betão são dependentes da qualidade e proporções dos seus constituintes, do processo de fabrico, das condições de cura, entre outros, resultando numa difícil análise. Algumas propriedades como a resistência à compressão, à tração e à flexão deverão ser calculadas por métodos destrutivos devido à superioridade de rigor obtido, obrigando sempre à extração ou produção de amostras de betão.

Existem dois tipos de ensaios não destrutivos: os que não causam qualquer tipo de danos no betão, como ensaio de permeabilidade, resistividade, radiografia, ultrassons, entre outros, e os ensaios semi-intrusivos, tais como *pull-out* e *pull-off*, que requerem uma posterior reparação da superfície testada.

Na presente dissertação, o molde instrumentado foi desenvolvido com o objetivo de permitir o estudo das propriedades do betão nas primeiras idades através de ensaios não-destrutivos, sendo possível a realização do estudo da resistividade e da velocidade de transmissão de ultrassons.

2.2.2. ENSAIO DE ULTRASSONS

2.2.2.1. INTRODUÇÃO

O ensaio de ultrassons é um método verdadeiramente não destrutivo de caracterização do betão que segue o princípio fundamental da emissão de impulsos de vibrações longitudinais por transdutores eletroacústicos em contacto com a superfície de betão.

Apesar de não ser totalmente representativo das características do betão em estudo, a grande vantagem deste ensaio face aos ensaios mecânicos é permitir uma análise direta na estrutura, não dependendo de provetes nem da análise em ambientes controlados, como laboratórios. (Sampaio, C.M.C.P., 2010)

Nas últimas décadas o ensaio de ultrassons tem permitido eficazmente a determinação da uniformidade do betão, numa peça ou entre peças, a medição da deterioração das propriedades do betão ao longo do tempo, a investigação de danos provocados pelo fogo, o congelamento e os estragos provocados por outros agentes, uma caracterização da qualidade do betão e também a determinação do módulo de elasticidade. Algumas destas características dependem de correlações.

A Teoria da Propagação de Ondas, a base deste ensaio, diz-nos que quando a superfície de um meio sólido-elástico é perturbada por uma carga dinâmica ou vibratória, são gerados três tipos diferentes de ondas (ondas de compressão, transversais e de superfície). Como a velocidade depende das propriedades elásticas e da densidade do meio de propagação, as velocidades das ondas serão diferentes, verificando-se então que as ondas de compressão são as mais rápidas, seguidas das ondas transversais. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, Rio, J. and Figueiras, J.)

A aplicação deste ensaio é realizada por um aparelho portátil e de simples utilização, composto no mínimo por dois transdutores. O aparelho pode também estar ligado a um osciloscópio que permite a observação da natureza do sinal recebido. Quando estimulado por um impulso eletrónico, um transdutor gera ondas sobre a forma de oscilações mecânicas, que serão lidas por um transdutor recetor. A energia mecânica lida pelo recetor é convertida em impulsos elétricos da mesma frequência do sinal emitido e é feita a leitura do tempo de chegada das ondas. (John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

É de grande importância que se garanta um contacto adequado entre o provete e os transdutores porque, no caso de contacto parcial, a presença de ar introduzirá erros na leitura. Para que se consiga garantir o contacto adequado é aplicada uma camada fina de um produto acoplante tal como gel, vaselina, sabão líquido entre outros, que proporcionam uma uniformização do contato entre o transdutor e a superfície. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004)

Existem três tipos de aplicação do ensaio, o método de transmissão direta, transmissão semidirecta e transmissão indireta, sendo o mais desejável o método direto.

No método direto, os transdutores são colocados frente a frente em faces opostas, sendo o método mais eficaz devido à linearidade do caminho de ondas. Esta aplicação é normalmente usada para avaliação da resistência mecânica, deteção de descontinuidades, homogeneidade e obtenção do módulo de elasticidade (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006).

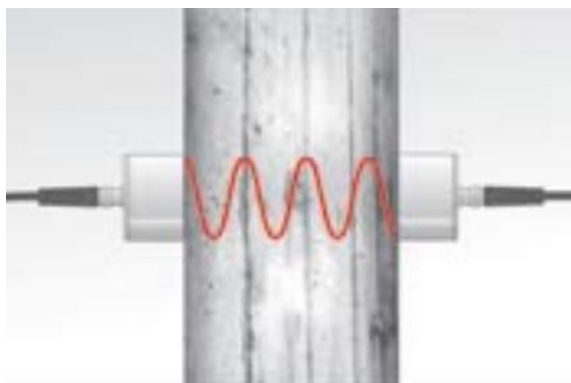


Figura 2.9 - Método direto (Catologue, P., 2007)

O método semidirecto consiste na aplicação dos transdutores em faces perpendiculares do objeto em estudo, obrigando a que se obedeça a uma distância mínima entre transdutores, para que não se perca a totalidade do impulso emitido. Este método apresenta valores bastante satisfatórios e é normalmente usado quando se pretende evitar regiões de armadura pelo facto da velocidade de propagação dos impulsos no metal ser o dobro da velocidade no betão (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006).

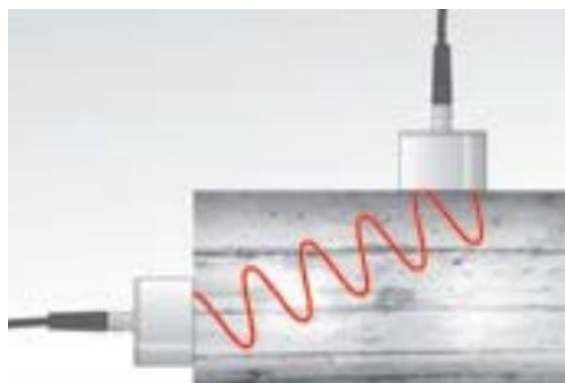


Figura 2.10 - Método semidireto (Catologue, P., 2007)

A transmissão indireta é feita com a colocação dos transdutores na mesma face, sendo o método menos satisfatório visto que o sinal emitido é significativamente inferior ao recebido. Geralmente usado quando o acesso é limitado, como no caso de apenas se poder fazer a leitura numa face do objeto (estudo de lajes, pavimentos de betão, barragens, entre outros, e estudo da qualidade de betão superficial). Este método exige que seja realizado um procedimento especial para a determinação da velocidade de impulso já que em alguns casos o sinal recebido é apenas 2% a 3% do sinal emitido (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006).



Figura 2.11 - Método indireto (Catalogue, P., 2007)

A colocação muito próxima dos transdutores leva a uma propagação deficiente do impulso sendo esta feita pela camada superficial; pelo contrário, o afastamento destes leva a uma propagação feita por uma camada mais profunda.

Se o ensaio for realizado numa estrutura em que o betão superior é diferente do betão mais profundo, pode levar a uma não concordância de valores. No entanto, isto pode ter interesse no estudo e controlo de qualidade de construção, com a deteção e estimativa da espessura das diferentes camadas constituintes do betão.

A velocidade obtida nas medições é influenciada por inúmeros fatores que devem ser tidos em conta em prol da maior fiabilidade possível. Quando em contacto com uma região de baixa compactação ou danificada, esta provocará uma velocidade de onda inferior, permitindo então uma conclusão do nível de imperfeição presente. Como o impulso não consegue passar pelo ar, por se tratar de ondas mecânicas, a passagem do impulso será mais demorada por ter de percorrer um caminho superior em torno das fendas.

O uso desta técnica de estudo deve ser realizada por pessoal diferenciado e com experiência, que corretamente interprete os resultados e consiga questionar a sua fiabilidade perante as diferentes variáveis que podem afetar a medição.

As principais razões de utilização deste método são: execução simples, tanto em laboratório como em campo; versatilidade, sendo um método utilizado em inúmeras áreas; e uma grande oferta de aparelhos, a um custo acessível.

Como principais desvantagens o método conta com as variáveis estudadas de seguida que influenciam os resultados obtidos, limitando logo a sua aplicabilidade e fiabilidade. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004)

2.2.2.2. VARIÁVEIS DO BETÃO

De seguida será feita uma descrição dos principais fatores que influenciam a velocidade de propagação de ondas. Estas variáveis podem estar diretamente relacionadas com o betão e os seus constituintes ou apenas com fatores do meio onde é feito o ensaio.

- Tipo e dimensão do agregado:

Como visto anteriormente, a velocidade de propagação dos impulsos varia com o meio e a sua densidade, fazendo com que geralmente a velocidade de transmissão nos agregados, de maior densidade, seja

superior à do cimento. Conclui-se que a velocidade de propagação das ondas varia com o tipo de agregado. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Tipo de cimento:

O tipo de cimento não afeta diretamente a velocidade de propagação, mas sim a libertação de calor provocada pelo seu processo de hidratação, devido à reação química do cimento com a água. Isto pode levar a um aumento do módulo de elasticidade e, por sua vez, a um aumento da velocidade. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Razão água/cimento:

O aumento da razão água/cimento resulta numa diminuição da densidade do betão, das resistências tanto à compressão como à flexão e uma variação do calor de hidratação libertado, levando então a uma redução da velocidade de impulso. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Aditivos:

Os aditivos podem influenciar a velocidade de propagação das ondas por alterarem o processo de hidratação, ou seja, se um aditivo alterar as características do betão, consequentemente alterará a velocidade do impulso. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Idade do betão:

A evolução da velocidade de propagação das ondas está relacionada com o aumento da rigidez, por sua vez relacionado com o aumento da densidade; ambas as características estão dependentes da idade do betão. Devido a erros experimentais, não é possível relacionar diretamente a resistência do betão com a velocidade de propagação de ondas porque a curva de crescimento da velocidade de ultrassons atinge o seu ponto máximo mais cedo do que a resistência do betão. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Contacto acústico:

Tal como visto anteriormente, é de enorme importância para a leitura da velocidade que o contacto entre os transdutores e as peças seja feita o mais uniformemente possível. Isto deve-se a que apenas parte do impulso seja diretamente transmitido para a peça, traduzindo-se em erros na leitura. Devido à incerteza do contacto, devem ser realizadas várias medições registando-se o valor mínimo destes, correspondente ao menor caminho percorrido.

Caso a superfície seja muito rugosa e pouco uniforme, é necessário um nivelamento da superfície, ou então um nivelamento mais rápido como o uso de resina epóxi ou algum tipo de plastificante, o mais finamente possível, que garanta uma boa adesão ao betão e um contacto mais homogêneo e limpo. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Temperatura do betão:

Segundo estudos feitos, provou-se que, no intervalo de 10 a 30 graus Celcius, os valores das propriedades do betão, tais como a velocidade de propagação das ondas e a resistência, as variações são insignificantes. Fora deste intervalo é necessário o uso de correções da velocidade de impulso, tal como se pode ver de seguida na Tabela 2.2. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

Tabela 2.2 - Correções da Velocidade de Impulso devido a Variações de Temperatura

Correções da Velocidade de Impulso devido a Variações de Temperatura		
Correção (%)		
Temperatura do Betão	Betão Seco	Betão Saturado
60	+5	+4
40	+2	+1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
Menos de -4	-1,5	-7,5

- Teor de humidade:

O teor de humidade irá afetar a velocidade de impulso devido a razões químicas e físicas. A presença de água nos vazios (humidade) altera as condições de cura na hidratação do betão. No caso das peças saturadas, as ondas poderão ser transmitidas pela água, mas com velocidades inferiores do que as transmitidas pelo betão. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Comprimento do percurso:

A distância entre transdutores é de grande importância porque estes devem garantir que se consegue receber energia mínima para se poder fazer uma leitura correta. Deve ser tido em conta o carácter heterogêneo do betão para permitir que se faça uma leitura correta dos vários meios de condução do sinal. Geralmente, a velocidade de impulso não é afetada por variações do comprimento de percurso, mas, para comprimentos longos, a velocidade de onda tenderá a reduzir. Por norma, a redução da velocidade é pequena e dentro da tolerância aceite para a eficácia do equipamento. Deve-se obedecer a uma relação entre dimensão de agregado mínima e a distância mínima entre transdutores, como se pode visualizar na tabela seguinte. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

Tabela 2.3 – Distância entre Transdutores

Distância entre Transdutores	
Agregado	Distância mínima
Agregado ≤ 30 mm	100 mm
Agregado ≤ 45 mm	150 mm

- Dimensão e formato do provete:

A velocidade de impulso é praticamente independente do tamanho e forma da peça em estudo, mas a menor aresta da peça em estudo não pode ser inferior ao comprimento de onda. Caso a aresta mínima seja menor do que o comprimento de onda ou se for usado o método de aplicação indireto, pode levar a diferentes velocidades de ultrassons medidas. A tabela seguinte relaciona as arestas mínimas com as diferentes frequências. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

Tabela 2.4 – Aresta mínima para Frequência do Transdutor

Aresta mínima para Frequência do Transdutor		
Frequência mínima (kHz)	Aresta mínima (mm)	Distância de Transdutores (mm)
60	70	100-700
40	150	200-1500
20	300	>1500

- Esforços:

O facto de uma estrutura estar tensionada não afeta a velocidade de impulso, a menos que os esforços sejam de tal importância que gerem fissuração na peça, levando à presença de ar entre partículas que comprometerá a passagem correta do impulso. Está provado que em condições de serviço com tensões inferiores a um terço da resistência máxima de compressão, os valores registados são considerados corretos. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Cura do betão:

A cura do betão influencia a velocidade de impulso de igual maneira que a idade do betão, devido ao endurecimento deste. Estudos provaram que peças curadas em laboratório têm significativas diferenças na velocidade de impulso em relação a peças curadas ao ar livre. Estas diferenças devem-se à variação do processo de hidratação do cimento, que varia com as condições de cura, ou também à presença de água livre nos vazios. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

- Efeito dos varões de aço:

A presença de armadura no betão é dos fatores de maior importância na velocidade de propagação de onda, como foi visto anteriormente nos tipos de método de leitura. A velocidade de propagação do impulso num meio metálico é, por norma, superior à do betão, comprometendo a análise dos dados. É de grande importância que se faça o correto posicionamento dos transdutores evitando a localização dos varões de aço. (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004, John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006, Neville, A.M., 1995, Sampaio, C.M.C.P., 2010)

2.2.2.3. APLICAÇÕES

As principais aplicações do método dos ultrassons consistem na medição da uniformidade do betão, deteção de fissuras, estimativa da resistência, estudo da deterioração do betão, medição do módulo de elasticidade e estudo da hidratação do cimento. A presente dissertação conta com o estudo da velocidade de ultrassons para uma interpretação do endurecimento e do aumento da resistência do betão ao longo do tempo de ensaio. De seguida será feita uma análise das principais aplicações:

- Medição da uniformidade do betão e deteção de fissuras:

A medição da uniformidade do betão é uma das aplicações mais valorizadas e eficazes por permitir uma rápida e correta avaliação da variabilidade do material. Esta variabilidade deve-se à heterogeneidade dos materiais, à fissuração interna e deterioração do material que causam uma redução na velocidade de propagação de impulso.

Para melhor interpretação da peça é recomendável que se faça uma leitura em vários pontos, como por exemplo uma leitura em grelha.

Apesar do método dos ultrassons comprovar que a peça se encontra defeituosa devido à fissuração ou outras causas, os resultados devem ser relacionados com uma estimativa da resistência, pois esta é a propriedade mais característica do material.

- Estimativa da Resistência:

A principal utilização deste método na presente dissertação é a estimativa da resistência, juntamente com o estudo da hidratação do cimento, por ser um método que permite uma fácil e rápida interpretação da evolução das propriedades físicas do betão ao longo do tempo.

Na verdade não existe maneira de se prever totalmente a resistência do betão segundo o método dos ultrassons, embora seja possível obter uma estimativa segundo comparações gráficas, já previamente estudadas por outros autores, com rigor dependente dos vários fatores que influenciam a velocidade de impulso.

- Medição do Módulo de Elasticidade:

A velocidade de transmissão das ondas depende das características elásticas dos materiais, definidas pela teoria de propagação das ondas. Assim, é possível estimar o módulo de elasticidade quando os valores da densidade e o coeficiente de Poisson do material são conhecidos.

Além deste método, é também possível estimar o módulo de elasticidade através de uma correlação com os valores da frequência de vibração. Geralmente o módulo de elasticidade obtido pela medição da velocidade de impulso é superior ao obtido pela correlação com as frequências de vibração.

- Estudo da Hidratação do Cimento:

A base de estudo desta dissertação consiste no estudo do comportamento térmico secundário ao processo de hidratação do cimento. Para uma melhor interpretação da evolução do endurecimento do betão ao longo do processo de hidratação é então aplicado este ensaio.

Este método é muito eficaz na deteção de variações das propriedades do betão nas primeiras idades. É possível verificar o efeito de diferentes qualidades de cimento ou razões água-cimento no endurecimento do betão.

2.2.3. RESISTIVIDADE

2.2.3.1. INTRODUÇÃO

Segundo John H. Bungey, S.G.M.M.G.G. (2006) a resistividade de um material é uma medida da capacidade de retardar a passagem da eletricidade. Os ensaios da resistividade elétrica têm sido usados desde há muitos anos pelos geólogos com o objetivo de estudar a composição do solo, graças aos valores de resistividade diferentes para cada material. Esta técnica é aplicada porque as resistividades variam muito consoante o material (por exemplo, a resistividade do cobre que é um bom condutor é de $10^8 \Omega m$, enquanto que a resistividade de um mau condutor como o calcário é de $10^8 \Omega m$).

Graças ao uso desta técnica e da grande variabilidade de resistividades por parte dos materiais, com uma simples leitura é possível compreender a composição do solo (Herman, R., 2001).



Figura 2.12 - Resistividades dos materiais (Silva, P.C.F., 2011)

Relacionando esta técnica com o betão, a resistividade no betão pode variar entre os valores de 10^1 a $10^5 \Omega\text{m}$, principalmente influenciada pelos constituintes da mistura e pelo meio ambiente. No betão a corrente é transmitida pelos iões nos seus constituintes, verificando-se que quanto maior for a quantidade de água e a dimensão dos poros, menor será a resistividade lida. Sabe-se que a resistividade aumenta para uma razão água/cimento menor, tempo de cura menor e o uso de adjuvantes. Como a resistividade é reduzida pela presença de água, também se verifica que ao longo do processo de secagem do betão, a resistividade irá então aumentar.(Polder, R.B., 2001)

2.2.3.2. APLICAÇÃO

Inicialmente a aplicação deste ensaio devia-se ao estudo da durabilidade do betão, sabendo-se que a deterioração estrutural do betão é principalmente causada pelo ataque químico como sulfatos, danos de congelamento e descongelamento, abrasão e fogo. (John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006)

A aplicação desta técnica na presente dissertação baseia-se no facto da evolução da resistividade elétrica apresentar um comportamento idêntico ao da resistência mecânica do betão, podendo-se então concluir que o uso deste método em laboratório ou mesmo numa unidade de pré-fabricação, com betões bem caracterizados, poderá permitir uma estimativa das resistências mecânicas. (Silva, P.C.F., 2011)

O método de medição da resistividade depende do elemento em estudo. Caso se trate de uma medição em laboratório ou de uma peça já projetada com o intuito de ser monitorizada, aplica-se a técnica dos dois elétrodos. Esta técnica consiste na aplicação da lei de Ohm para o cálculo da resistência, através da medição da diferença de potencial e intensidade da corrente elétrica entre os dois elétrodos. (Polder, R.B., 2001)

A resistividade é depois calculada através da multiplicação da resistência elétrica por uma constante geométrica que depende da secção reta e do comprimento unitário.

$$R = \frac{V}{I} = \rho \times \frac{L}{A} \Leftrightarrow \rho = \frac{V}{A} \times \frac{A}{L} \quad (2.24)$$

Em que:

R - Resistência Elétrica (Ω);

V - Diferença de Potencial (V);

I – Intensidade da Corrente (A);

ρ – Resistividade Elétrica (Ωm);

A - Área do eléctrodo em contacto com o provete (m^2);

L – Distância entre elétrodos (m).

Na figura 2.13 é possível verificar uma aplicação do método dos dois elétrodos, em que a corrente elétrica é passada entre faces opostas do provete, e são medidas as variáveis diferença de potencial e intensidade de corrente entre essas mesmas faces.

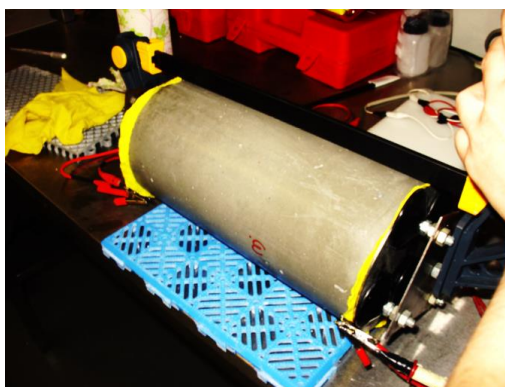


Figura 2.13 - Exemplo do método dos 2 elétrodos (P. C. Silva , R.M.F., H. Figueiras, 2012)

Caso se trate de uma medição feita em campo, a aplicação normalmente usada denomina-se por aplicação dos quatro eléctrodos. Realiza-se através de uma sonda conhecida por sonda de Wenner, composta por quatro eléctrodos igualmente distanciados que emitem corrente eléctrica a uma profundidade de betão igual à distância entre eléctrodos.

Os dois eléctrodos exteriores induzem a corrente e os dois eléctrodos interiores medem a diferença de potencial verificada, calculando-se a razão entre a energia emitida e a recebida, sendo esta a resistência do material.(Polder, R.B., 2001, Silva, P.C.F., 2011)

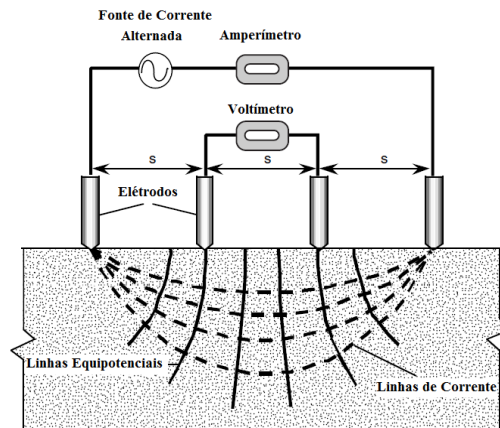


Figura 2.14 – Método dos 4 Eléctrodos (Sonda de Wenner) (Carino, V.M.M.a.N.J., 2004)

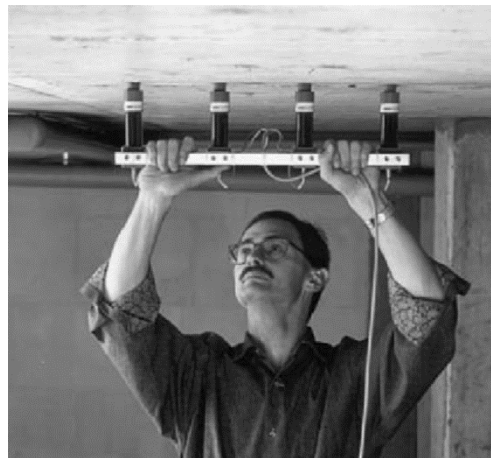


Figura 2.15 – Método dos 4 eléctrodos (John H. Bungey, S.G.M.M.G.G., 2006)

A resistividade do método dos quatro eléctrodos é calculada graças à fórmula:

$$\rho = k \times R \Leftrightarrow k = 2 \times \pi \times a \Leftrightarrow R = \frac{V}{I} \quad (2.25)$$

Em que:

ρ – Resistividade Eléctrica ($k\Omega\text{cm}$);

k – Constante Geométrica (cm);

R – Resistência Eléctrica ($k\Omega$);

I – Intensidade Elétrica (mA);

V – Diferença de Potencial (V);

a – Distância entre elétrodo (cm).

O resultado obtido conta com um erro até 25% da resistividade real devido à não homogeneidade do betão e à limitação do tamanho dos elétrodo.(Polder, R.B., 2001)

Além dos anteriores métodos de aplicação ainda existe a aplicação de apenas um elétrodo. A leitura é feita graças à condução da energia elétrica por um disco metálico quando aplicado sobre um varão da armadura da peça em estudo, tal como apresentado na figura 2.16.



Figura 2.16 - Método de 1 elétrodo

A resistência da condução entre o disco e o varão metálico permite o cálculo da resistividade através de uma constante que depende do recobrimento e da espessura do varão de aço.

2.2.3.3. VARIÁVEIS

A resistividade elétrica, tal como visto anteriormente, consiste na resistência que certo material ou materiais têm à condução da corrente elétrica, dependendo do tipo de agregado e sua concentração, e outras variáveis como o tipo e dosagem de ligante, a razão água cimento, adição de minerais reativos, presença de adjuvantes, efeito de temperatura e humidade. (Caetano, H.F.d.S., 2013)

- Temperatura:

Segundo Caetano, H.F.d.S. (2013) a temperatura tem um papel muito importante na medição da resistividade elétrica do betão, na medida em que o aumento de temperatura levará à mudança de estado físico do betão, diminuindo a sua viscosidade, consequentemente levando a um aumento da resistividade.

Esta variável está dependente da humidade pois o aumento de temperatura leva a uma redução da humidade nos poros, e, consequentemente, levando a uma maior resistência da condução da energia elétrica pelos materiais. (Silva, P.C.F., 2011)

- Teor de Humidade:

Segundo Hunkeler, F. (1996), para uma humidade relativa de 40%, a condutividade elétrica do betão anula-se. Isto deve-se ao facto de a água retida nos poros não ter capacidade condutora, sendo a condução feita pelos outros constituintes e pela matriz cimentícia que contém ainda grande teor de água. Conclui-se que o aumento de humidade resulta num decréscimo da resistividade elétrica, facto verificável na relação de água/cimento.

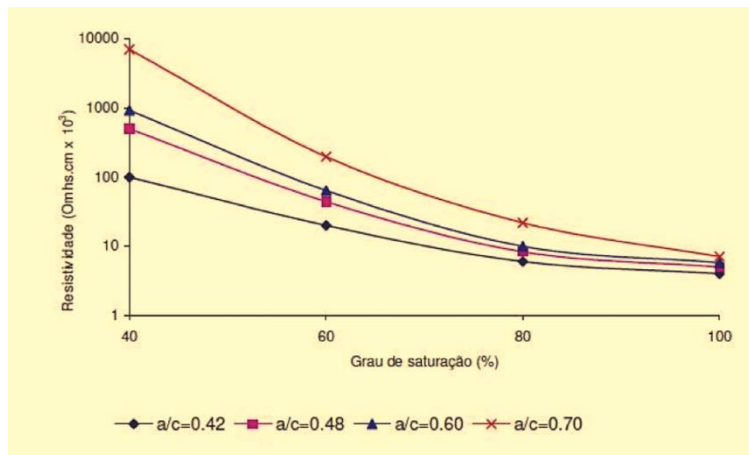


Figura 2.17 - Relação de Grau de Saturação com a Resistividade (Silva, P.C.F., 2011)

- Razão Água/Cimento:

A razão água/cimento é uma das variáveis mais importantes no estudo feito para a presente dissertação. Fazendo variar a razão água/cimento, as características mecânicas também sofrerão diferenças, visto que a microestrutura da pasta de cimento é alterada. Segundo estudos feitos por Hughes, B. [et al.] (1985) em betões com 28 dias de idade, constatou-se que, para um teor de 400 kg/m³ de cimento, a resistividade elétrica passa para metade quando se altera a razão água/cimento de 0,40 para 0,55.

Whiting, D.A. and Nagi, M.A. (2003) também o provou para diferentes proporções de cimento, tal como se pode verificar nas figuras seguintes.

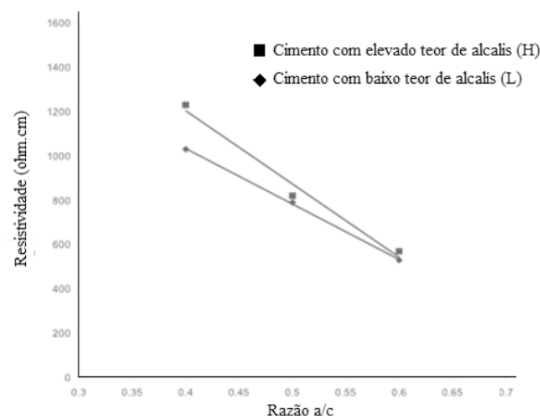


Figura 2.18 – Razão água cimento (Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003)

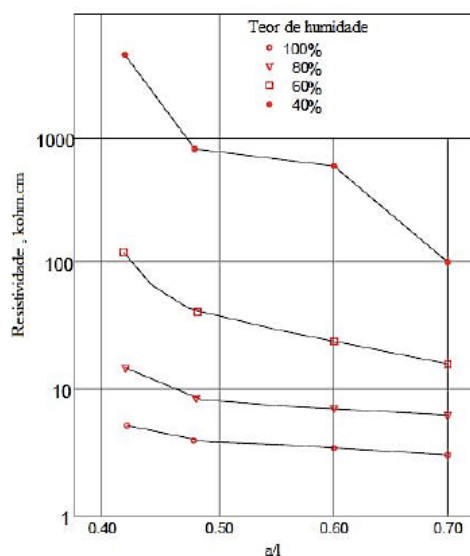


Figura 2.19 – Teor de Humidade (Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003)

- Tipo de Cimento:

Como visto anteriormente, a resistividade no betão depende da matriz cimentícia, da distribuição e quantidade de poros, características que variam com a constituição química do cimento.

Whiting, D.A. and Nagi, M.A. (2003) realizou um estudo em que compara cimento Portland Normal e cimento aluminoso, concluindo que o primeiro apresenta valores de resistividades inferiores ao cimento aluminoso, tal como se pode verificar na figura seguinte.

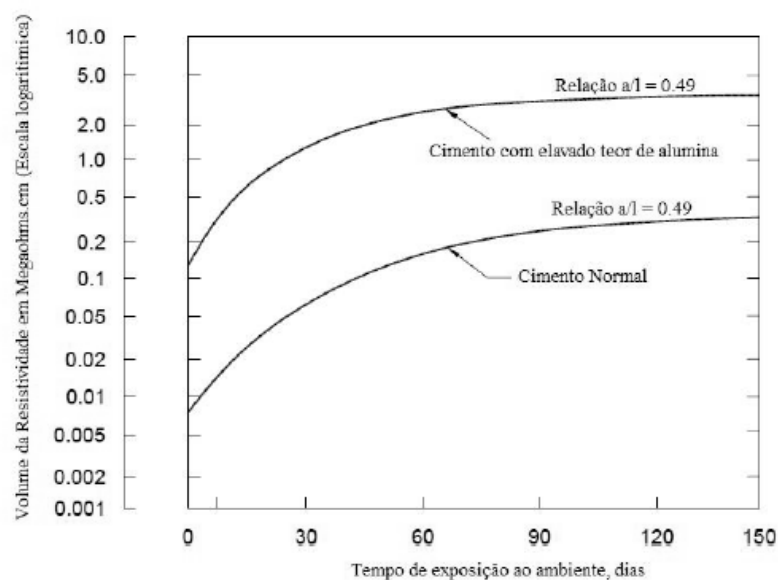


Figura 2.20 – Relação entre Tipo de Cimento e Resistividade (Whiting, D.A. and Nagi, M.A., 2003)

- Tipo e concentração de Agregados:

Através de um estudo experimental, Hughes, B. [et al.] (1985) chegou à conclusão que um betão com uma razão agregado/cimento de 2,92 obtém valores de resistividade de 4,86 enquanto que para 4,36 o valor da resistividade sobe para os 5,73 k Ω .cm. Como a resistividade do cimento é inferior à dos agregados, podemos então concluir que quanto maior for a razão agregado/cimento, maior será a sua resistividade associada.

Além da concentração de agregados, o tipo de agregado também influencia a resistividade da mistura, tal como se pode verificar na tabela seguinte.

Tabela 2.5 – Resistividade elétrica para diferentes agregados

Agregado	ρ (kΩ.cm)
Areia	18
Xisto	30
Mármore	290
Granito	880

- Adições e Adjuvantes:

Segundo Silva, B.J.M.d. (2005), o uso de adições ao betão resulta em alterações da matriz cimentícia deste, devido às características pozolânicas do cimento, alterando a mobilidade dos iões presentes na mistura.

As alterações da matriz cimentícia são, na verdade, uma redução da porosidade do betão contribuindo para um aumento da resistividade elétrica do betão quando comparado com um betão exclusivamente composto com cimento Portland. (Caetano, H.F.d.S., 2013)

O uso de adjuvantes como superplastificantes é um tema não desenvolvido ainda, não havendo certeza do seu efeito real.

- Armaduras:

O estudo da resistividade elétrica em peças de betão armado pode ser comprometido graças à maior condução elétrica dos metais face aos constituintes do betão. Desta maneira, em estruturas de betão armado é de grande importância que se faça um levantamento da localização das armaduras para que se possa proceder a um ajuste ou relocação do ponto de medição. Segundo Silva, P.C.F. (2011) se a medição for realizada na diagonal ou paralelamente à armadura presente na peça, os erros de medição podem ser minimizados.

3

MOLDE INSTRUMENTADO

3.1. ASPETOS GERAIS

Um dos principais objetivos da presente dissertação consiste na realização de ensaios em laboratório de pastas e argamassas nas primeiras idades. Para este estudo, foi utilizado o molde instrumentado desenvolvido por (Caetano, H.F.d.S., 2013), que permite fazer a leitura da evolução da temperatura registada, graças ao registo da temperatura na base do molde, e também a leitura da velocidade de transmissão de ultrassons e da resistividade.

Os moldes realizados no passado foram utilizados ao longo de todos os ensaios, tendo sido feito um esforço para se manter o processo de medição fiel ao inicial, garantindo uma continuidade dos resultados obtidos anteriormente. Novas medições foram realizadas com o objetivo de reunir o máximo de informações que permitissem o desenvolvimento de comparações necessárias à calibração da modelação numérica.

Por fim, foram desenvolvidas algumas propostas de modificações ao molde para que, através do uso de novos componentes eletrónicos, se atinja uma redução do custo do molde, se garanta uma maior autonomia no registo de dados da temperatura e uma maior eficácia graças a uma nova geometria.

3.2. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES

O objetivo inicial do desenvolvimento do molde consistia em produzir um provete cúbico de pequena dimensão que permitisse fazer uma leitura realista do comportamento habitual das pastas, argamassas e betões, no processo de endurecimento e desenvolvimento das propriedades mecânicas.

Para isto foi desenvolvido um molde em madeira que caracterizasse um comportamento similar das cofragens utilizadas em obra, acoplado de aparelhos e componentes que permitem fazer a leitura e registo da evolução da temperatura, assim como a leitura da resistividade elétrica e da velocidade de propagação de ultrassons.

O molde instrumentado foi projetado com o objetivo de cumprir os seguintes requisitos:

- Fácil montagem e desmontagem;
- Fácil transporte e limpeza;
- Leve, robusto e reutilizável para vários ensaios experimentais;
- Capacidade de medição e registo da evolução da temperatura;
- Capacidade de leitura da resistividade:

- Capacidade da leitura de ultrassons sem que os transdutores piezoelétricos entrassem em contacto direto com a pasta ou argamassa;
- Atribuir uma forma cúbica de 10 centímetros de aresta aos provetes.

Após a utilização de um primeiro protótipo, conclui-se que o molde não se encontrava otimizado por não se verificarem as condições de estanquidade necessárias e pelo facto do material utilizado não oferecer resistência quando em contacto com a água, por se danificar pela absorção de água. A necessidade da retirada da tampa sempre que se procedia às medições da resistividade conduzia a uma parcial libertação de calor de hidratação produzido pela reação, levando a uma incorreta leitura das temperaturas. Por último, o método de fixação das folhas de acetato com fita-cola não se verificou suficiente para assegurar a estanquidade pelos orifícios.

Face estas situações foi então necessário o desenvolvimento de um novo molde (HC2), que contava com o uso de um novo material de cofragem, contraplacado marítimo, material reconhecido na construção civil como material de cofragens de qualidade superior graças ao seu tratamento envernizado, oferecendo durabilidade superior e menor absorção numa situação de fuga.

Para fazer frente ao problema da estanquidade foi adotado o uso de um vedante (silicone branco) ao longo das arestas, assim como na fixação das chapas metálicas. O vedante também permitiu que se garantissem melhores condições de conservação do calor de hidratação gerado no interior do molde.

Para dar resposta ao problema da retirada da tampa sempre que era necessária a medição da resistividade, o colega decidiu abrir dois pequenos orifícios na tampa, que juntamente com o uso de nova geometria das redes metálicas, seguras com uso de pequenas quantidades de silicone, permitem uma fácil leitura da resistividade sem interferência com as condições de conservação do calor.

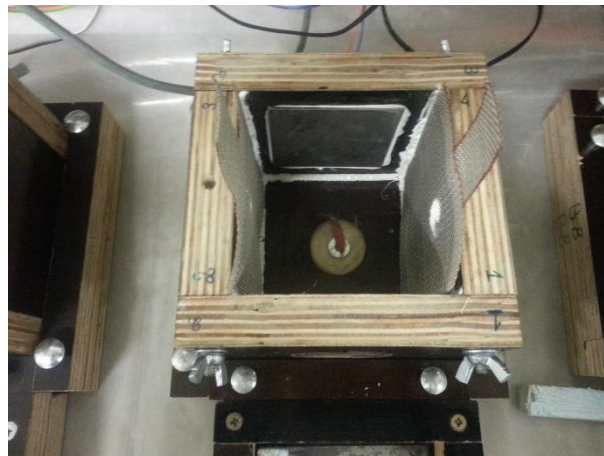


Figura 3.1 – Detalhe da chapa metálica e das malhas metálicas adotadas

Com as alterações acima descritas foram obtidos quatro moldes otimizados, que cumpriam com sucesso todos os requisitos impostos (HC2,HC2A,HC2B,HC2C), e permitiram a realização de vários ensaios simultaneamente.

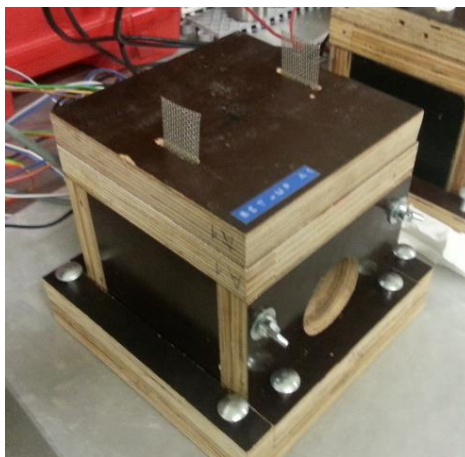


Figura 3.2 – Molde Instrumentado HC2A

3.3. ESTUDOS DO MOLDE

Tal como descrito anteriormente, o molde foi projetado para permitir uma leitura da evolução de algumas variáveis do betão nas primeiras idades, mais precisamente a evolução do comportamento térmico, o estudo dos ultrassons e da resistividade. De seguida será feita uma descrição do processo de obtenção destas variáveis a partir do molde.

3.3.1. TEMPERATURA

A característica mais importante do molde para o desenvolvimento desta dissertação consiste no estudo da produção de calor de hidratação. Para tal foi instalado um detetor térmico implantado na base do molde embebido em acrílico, que oferece proteção à ação química das argamassas e pastas, que permite uma leitura correta da temperatura graças a um posicionamento muito superficial deste na base do molde.

A leitura da temperatura é feita por um sensor de temperatura do tipo RTD (*Resistance Temperature Detector*) também denominado por PT100. A razão do uso deste sensor de temperatura deve-se à sua elevada exatidão, grande amplitude de leitura e fácil aplicação.

A obtenção dos dados provenientes do PT100 é feita pela ligação deste a um DataTaker DT 505, responsável pela leitura e armazenamento dos valores lidos pelo sensor.

3.3.2. ULTRASSONS

O ensaios de ultrassons, ao contrário do estudo do comportamento térmico, não é autónomo, sendo necessário que a leitura seja realizada manualmente, usando um aparelho de ultrassons. É necessário o uso de um computador para registo das velocidades obtidas e da hora na qual é realizada a leitura para garantir o maior rigor possível nos dados obtidos. Caso a leitura não seja realizada corretamente, facilmente se verifica o erro porque os valores obtidos são muito díspares dos expectáveis.

O equipamento usado para medir o tempo de viagem do impulso de onda consiste num TICO da *Proceq Testing Instruments*, constituído por dois transdutores piezoelétricos cilíndricos, com 49,5 milímetros de diâmetro e 34 milímetros de altura, funcionando tanto como recetor ou emissor.

Tratando-se de uma leitura realizada através de dois orifícios alinhados em 2 faces verticais opostas do molde de ensaio, o método de transmissão aplicado é o direto, por ser o que garante o máximo de energia de impulso recebida, garantindo a melhor qualidade de resultados.

Os orifícios de 50 a 55 milímetros de diâmetro foram realizados com o objetivo de permitir que a sua dimensão não comprometesse a propagação das ondas, ao ser realizada através das faces verticais do molde, mas também teria de garantir que os transdutores não caíam durante o ensaio.



Figura 3.3 – Face com orifício para leitura de ultrassons

O ensaio é realizado três vezes seguidas para garantir uniformidade dos resultados e, posteriormente, é usado o valor mínimo das velocidades de ultrassons obtidas. Este é o valor que caracteriza o caminho mais curto, não sujeito a tantas imperfeições geométricas, garantindo assim uma melhor interpretação do estado do betão.

3.3.3. RESISTIVIDADE

O estudo da resistividade é conseguido através dos dois elétrodos, que pode ser aplicado com corrente contínua ou alternada.

A diferença entre corrente contínua ou alternada consiste na forma da onda, sendo a corrente alternada uma corrente que varia com o tempo, constituída por fases. Segundo alguns autores, a corrente contínua induz a polarização dos elétrodos, traduzindo-se em erros significativos. (Caetano, H.F.d.S., 2013, Carino, V.M.M.a.N.J., 2004)

(Caetano, H.F.d.S., 2013) propôs uma disposição de duas redes metálicas nas extremidades do provete, ver figura 3.4, funcionando como elétrodos, que garantem o contacto perfeito entre os mesmos e as pastas e argamassas em estudo. Desta maneira garante-se uma condução da corrente elétrica entre faces opostas do provete e uma leitura mais correta da condução da energia ao longo de todo o provete.

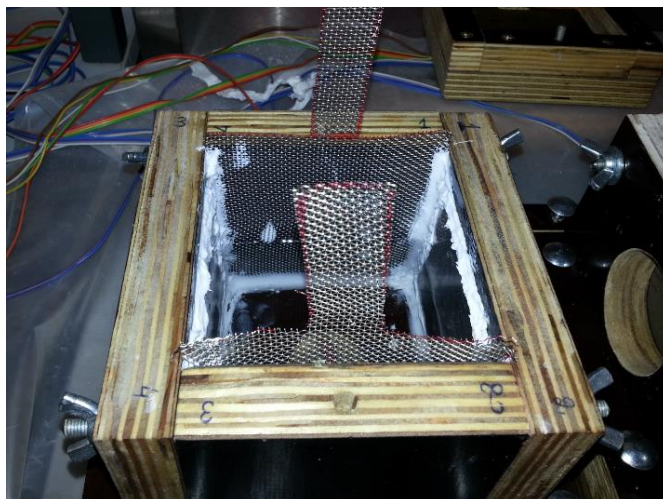


Figura 3.4 – Aplicação das redes metálicas

A utilização das redes metálicas levou à necessidade de criar dois pequenos orifícios na tampa para permitir a saída dos filamentos das redes e, assim, ser feita a ligação com o gerador de sinal. As aberturas na tampa resultaram numa redução do isolamento térmico, redução essa que se tentou reduzir com o preenchimento com papel (ver figura 3.5).

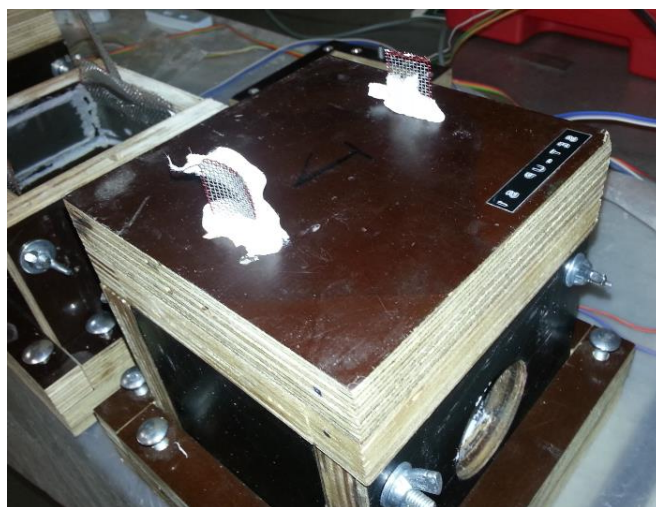


Figura 3.5 – Molde fechado com isolamento nos orifícios

O ensaio é realizado com o uso de um gerador de sinal 3390 50 Hz Arbitrary Waveform Generator da *Keithley* (Figura 3.11), gerando sinais com o tipo de onda sinusoidal de voltagem de 10 V e uma frequência de 100 Hz. A escolha deste tipo de sinal vai ao encontro de estudos experimentais previamente desenvolvidos no LABEST, que demonstraram tratar-se de uma frequência que garante bons resultados quer em provetes de betão quer em argamassas. (Caetano, H.F.d.S., 2013)

Para leitura da voltagem e intensidade de corrente é necessário o uso de dois multímetros, um da *Tektronix* e outro da *Keithley*, respetivamente.



Figura 3.6 – Multímetro da Keithley



Figura 3.7 – Multímetro da Tektronix

Este ensaio necessita de um operador para a aquisição e registo dos valores lidos pelos multímetros, sendo estes registados em folhas de cálculo em Excel, com a respetiva hora de leitura dos dados.

Estes valores serão então transformados primeiramente em resistência e posteriormente em resistividade graças às fórmulas seguintes:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$\rho = k \times R \quad (3.2)$$

$$k = 2 \times \pi \times a \quad (3.3)$$

$$a = 0,0989 \quad (3.4)$$

3.4. INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1. TICO - INSTRUMENTO ULTRASSÓNICO DA PROCEQ

Para a realização da medição da velocidade de ultrassons, foi utilizado um instrumento chamado TICO (ver figura 3.8).

A empresa responsável pela criação do instrumento de medição de ultrassons TICO, a *Proceq*, conta com mais de 50 anos de história de criação de instrumentos de medição de alta qualidade, mais precisamente instrumentos de teste não destrutivos de betão, metal e papel.



Figura 3.8 – TICO da Proceq

O instrumento TICO permite a determinação indireta do módulo de elasticidade do betão e a sua resistência, graças à relação da velocidade de ultrassons nos materiais por onde são conduzidos.

A sua utilização mais habitual é a deteção de imperfeições no betão, como fissuração ou defeitos provocados pelo fogo ou gelo.

A velocidade de ultrassons é calculada graças a transdutores circulares que têm a função de emitir e receber os impulsos eletromecânicos. O cálculo é realizado a partir do tempo decorrido entre a emissão e receção dos impulsos. A leitura pode ser feita de três diferentes modos como foi descrito no capítulo 2.3.1.2.



Figura 3.9 – Medição com uso do TICO (Catologue, P., 2007)

Tabela 3.1 – Especificações do TICO (Catologue, P., 2007)

Especificações	
Memória	Até 250 medições
Ecrã	128 x 128 pixéis, ecrã LCD
Intervalo de Medição	Aproximadamente 15 a 6550 μ s
Frequência de Impulso	3/s
Impedância	1 M Ω
Voltagem	1 kV
Transdutores	54 kHz com dois cabos BNC incluídos
Intervalo de Temperatura	0° a +60° C
Autonomia	30 horas com 6 pilhas AA (1.5V)
Dimensões	325 x 295 x 105 mm
Peso Bruto	3 kg

3.4.2. RTD (RESISTANCE TEMPERATURE DETECTOR)

Para a leitura da temperatura nos moldes foi usada uma termoresistência mais conhecida por RTD, *Resistance Temperature Detector* em inglês, que correlaciona a resistência elétrica com a temperatura.

Consiste num fio metálico feito de matéria pura como platina, níquel ou cobre, que, pela sua fragilidade, é envolvido numa proteção cerâmica ou de vidro.

O seu uso tem vindo a aumentar, substituindo os Termopar, graças à sua elevada precisão e à grande aplicabilidade para um grande intervalo de temperaturas.

O RTD, também conhecido por PT100 graças à sua resistência de 100Ω , conta como principais vantagens:

- Alta precisão
- Baixa variação
- Grande intervalo de leitura

Como limitações, o RTD tem grande dificuldade em superar temperaturas de 660°C e a leitura em temperaturas inferiores a -270°C revela uma sensibilidade de praticamente zero, não permitindo leituras reais. Quando comparado com outras termoresistências, a sensibilidade é ligeiramente inferior e tem tempos de resposta maiores.

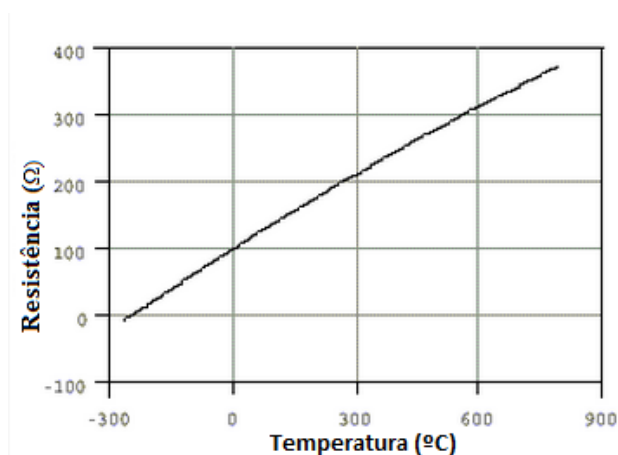


Figura 3.10 – Gráfico Resistência-Temperatura (Modificada) (Ziehl, 2013)

3.4.3. GERADOR DE SINAL DA KEITHLEY

Este equipamento, um gerador de forma de onda arbitrária, Arbitrary Waveform Generator (AWG) em inglês, é um equipamento eletrónico usado para gerar ondas elétricas que se diferencia de um gerador de funções por permitir a geração de qualquer tipo de onda, graças à presença de atenuadores e moduladores de sinal. As ondas emitidas podem ser unitárias ou em série.

Podem também ser usados como geradores de funções tradicionais, emitindo ondas conhecidas como Sin, Square, Ramp, Triangle, Noise e Pulse.

O Gerador de sinal 3390 da Keithley permite a geração de ondas de quase todas as formas, de maneira muito precisa e estável, graças à técnica DDS (Direct Digital Synthesis). (Keithley, 2013)



Figura 3.11 – Gerador de Sinal 3390 da Keithley (Keithley, 2013)

3.4.4. DATATAKER DT 505

O DT 505 é um *data logger*, um aparelho eletrónico que guarda dados e hora ou localização provenientes de um instrumento ou sensor externo. Por norma, são de pequenas dimensões, portáteis, alimentados via bateria ou corrente elétrica e equipados com microprocessadores, contêm memória interna ou permitem a associação a memórias externas. A programação de aquisição de dados é feita através de computadores e *softwares* especiais para ativar, visualizar e registar os dados lidos pelos sensores acoplados.

Existe uma grande variedade de *Data loggers* dependente da necessidade, como o tipo de medições, volume de dados e condições ambientais.

Uma das principais utilidades dos *Data loggers* é a possibilidade de automaticamente ler e guardar os dados, no período de tempo necessário, permitindo que medições de longa duração ocorram sem que haja a necessidade da presença de qualquer técnico.

O custo dos *Data loggers* é muito variável, tendo vindo a reduzir ao longo do tempo com a evolução da tecnologia, mas os aparelhos mais complicados podem custar milhares de euros.

A empresa *DataTaker* foi a responsável pelo desenvolvimento do DT 505, modelo de gama baixa. Esta empresa é especialista em desenvolvimento de *data loggers*, permitindo a acoplação de quase todo o tipo de sensores.

3.4.5. ARDUINO

O Arduino, produto de origem italiana é uma plataforma de desenvolvimento microcontrolada *open-source*. A sua geometria consiste numa placa com entradas e saídas, tanto digitais como analógicas, que permite inúmeras aplicações como robótica e leitura e aquisição de dados, entre muitas outras.

Este componente eletrónico conta com um microcontrolador Atmega328, 14 entradas e saídas digitais, 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16 MHz e um botão de reset.

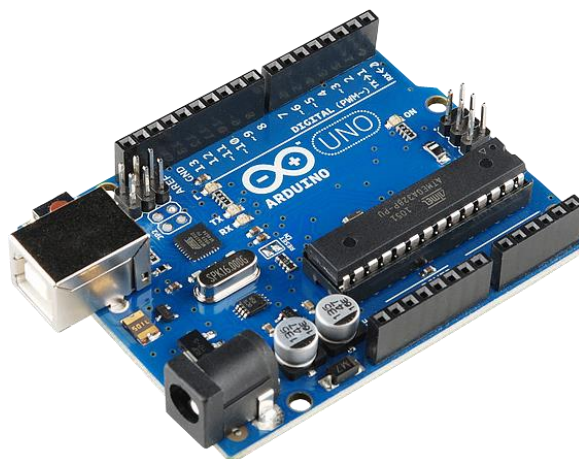


Figura 3.12 – Arduino

A sua programação é feita através de um aplicação informática em computador, utilizando uma linguagem denominada por Wiring, baseada em C/C++, de fácil utilização para iniciantes, apesar de apresentar elevada liberdade para os utilizadores avançados. Visto ser um componente open-source, o software de programação pode ser obtido gratuitamente, contando com uma enorme comunidade mundial de troca de informações.

A conexão ao computador pode ser feita via porta USB, Bluetooth ou Wireless, e a alimentação pode ser feita tanto via USB ou AC-DC, isto é, em fonte de energia externa, como uma bateria.

Tabela 3.2 – Características do Arduino

Microcontrolador	ATmega328P
Voltagem operacional	5V
Voltagem de alimentação (recomendada)	7-12V
Voltagem de alimentação (limites)	6-20V
Pinos I/O digitais	14 (dos quais 6 podem ser saídas PWM)
Pinos de entrada analógica	6
Corrente contínua por pino I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino 3.3V	50 mA
Memória flash	32 KB (2KB usados para o bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidade de clock	16 MHz

3.4.6. SENSOR DE TEMPERATURA LM35

O sensor de temperatura LM35 fabricado pela *National Semiconductor* funciona segundo o princípio de que um aumento de temperatura gera proporcionalmente uma diferença de potencial no díodo a uma taxa conhecida. Graças a esta diferença de potencial, gera-se um sinal analógico proporcional à temperatura em Celcius, de 10 mV/°C.

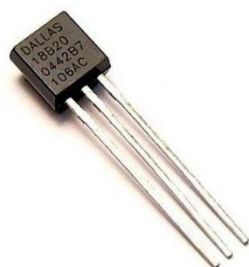


Figura 3.13 – Sensor de Temperatura LM35

Não é necessário qualquer tipo de calibração externa ou “trimming”, visto não possuir peças móveis. Este tipo de sensor permite trabalhar sob grande variabilidade de condições, garantindo fiabilidade entre medições e também semelhança de valores entre sensores iguais. (Ladyada, 2013)

Uma importante mais-valia do sensor LM35 é a sua fácil aplicação, podendo ser integrado num circuito como qualquer sensor de temperatura. No caso de ser colado ou consolidado, a variação de temperatura resultante destes processos está na ordem dos 0.01°C. (Incorporated, T.I., 2013)

A escolha do LM35 baseou-se também no seu baixo auto-aquecimento, já que este sensor apenas dissipa 60μA sob a forma de calor, ou seja, o aumento de temperatura que sofre devido à energia dissipada é de apenas 0.1°C, permitindo obter níveis de fiabilidade muito elevados, e, desta forma, obter leituras muito próximas da realidade.(ADD-THERM, 2013)

Este sensor de temperatura foi utilizado no desenvolvimento do novo molde, substituindo o sensor PT100 utilizado nos moldes anteriores não afetando a eficácia operacional deste.

Características e benefícios (ADD-THERM, 2013):

- Calibrado diretamente em graus Celsius (Centígrados)
- Linear 10,0 mV / °C (fator de escala)
- Precisão de 0,5°C (a 25 °C)
- Faixa de Operação de -55°C até 150 °C
- Adequado para aplicações remotas
- Baixo custo / Não necessita de calibração no circuito
- Alimentação 4V-30V
- Menos de 60 mA corrente de passagem
- Baixo auto-aquecimento, 0,08 °C em ar ambiente
- Baixa impedância de saída, 0,1 Ohm por 1 mA de carga

3.4.7. DHT11 *DIGITAL HUMIDITY*

Segundo (D-Robotics, 2010) o sensor DHT11 permite a leitura de temperatura e humidade. Tal como no sensor de temperatura LM35, as medições são obtidas pela diferença de potencial gerada pela diferença das condições climatéricas. Tratando-se de um sensor que não se degrada, é garantida grande fiabilidade e estabilidade a longo prazo.

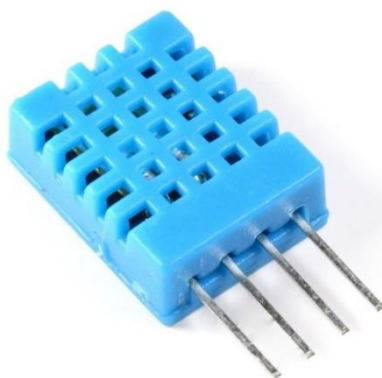


Figura 3.14 – Sensor de Humidade e Temperatura DHT11

Composto por uma resistência de medição de humidade, um NTC (termístor) para medir a temperatura é conectado a um microcontrolador de 8-bit, oferece resposta rápida, grande qualidade de aquisição de dados e custo muito reduzido.

A calibração do sensor é feita em laboratório, sendo garantida, desta forma, uma precisão de elevado nível.

O sensor DHT11 de dimensões reduzidas é composto por 4 pinos em linha, de baixo gasto de energia e permite transmissão de sinal até 20 metros.

Tabela 3.3 – Características do sensor DHT11 (D-Robotics, 2010)

Sensor	Intervalo de Medição	Eficácia de Medição de Humidade	Eficácia de Medição de Temperatura	Tipo de sensor
DHT11	20-90%RH 0-50 °C	±5% RH	±2°C	4 Pinos em linha

3.5. DESENVOLVIMENTO DE NOVO MOLDE

O molde desenvolvido por (Caetano, H.F.d.S., 2013) mostrou-se um sucesso em todos os sentidos, conseguindo cumprir todos os requisitos a que foi submetido, mostrando enorme eficácia e, mais importante, permitindo leituras precisas e fiáveis ao longo do tempo.

A sua constituição física garantiu também, apesar do elevado número de utilizações, que o estado dos moldes se tenha mantido sempre estável, apenas se verificando alguns danos na madeira das paredes do molde, secundários ao processo de descofragem e não por desgaste de abrasão química do betão. O processo de descofragem é dificultado pela presença do silicone branco, que consegue garantir com sucesso a estanquidade necessária ao molde, mas torna o molde muito rígido, obrigando ao uso de ferramentas para conseguir separar as partes do molde.

Mas, como em muitas obras de engenharia, processos de laboratório e desenvolvimento de modelos, há sempre aspetos a melhorar, que serão propostos nesta dissertação.

O molde anterior, apesar de todo o sucesso, pecava em pequenos aspetos, sendo os principais problemas a montagem e selagem. A montagem do molde é relativamente fácil, mas não perfeita, principalmente pela mobilidade das quatro paredes apesar do uso de estabilizadores. Este facto levou à necessidade do uso de silicone para completar os espaços entre as arestas do molde, silicone esta que leva um dia a secar antes que se possa proceder ao enchimento com a pasta.

Outro problema encontra-se na falta de autonomia do molde que é dependente do aparelho de medição e registo DataTaker. O aparelho DataTaker é um elemento frequentemente usado em campo, mas de elevado valor, mesmo na versão mais básica que foi usada neste ensaio (o seu valor ronda os 3mil euros). Para resolver o problema da autonomia, foi feito o estudo de várias alternativas que tinham de obedecer aos requisitos estipulados anteriormente, mantendo o mesmo rigor de leitura e registo de dados, não obrigando a grande alteração da geometria previamente utilizada e permitindo o uso dos materiais e sensores disponíveis em laboratório.

Os problemas de autonomia e redução de custo foram resolvidos graças à substituição do DataTaker por um componente eletrónico chamado Arduino (capítulo 3.4.5.), de dimensões reduzidas (tamanho de um cartão de crédito) que pode ser montado na tampa.

3.5.1. NOVA GEOMETRIA

O principal objetivo do desenvolvimento de uma nova geometria para o molde consiste na dispensa do uso da silicone, garantindo igual estanquidade ao molde, principalmente para o estudo das pastas e argamassas que, tal como têm sido ensaiadas, levam à necessidade de grande controlo de fugas.

Após o estudo do molde atual, concluiu-se que a principal preocupação no desenvolvimento de um novo molde consistia na redução do número de arestas livres, limitando as possibilidades de fuga. Definiu-se uma nova geometria com base num molde já existente (Figura 3.15), um pequeno molde cúbico metálico em que as suas fronteiras laterais eram compostas por dois elementos em “L”.



Figura 3.15 – Molde metálico em “L”

Além do problema de vários pontos de fuga, existe o problema do molde desenvolvido por (Caetano, H.F.d.S., 2013) não ser muito rígido, visto que o seu ponto de fixação principal se encontra na parte superior, apesar do uso de estabilizadores inferiores. Com a nova geometria proposta composta por dois elementos em “L” já se consegue garantir uma rigidez superior. Foi também pensado um método de limitar o movimento das paredes, tendo-se considerado o uso de pequenas reentrâncias na estrutura, garantindo que o movimento das peças seja muito reduzido, graças à obrigação de uma posição fixa de cada peça.

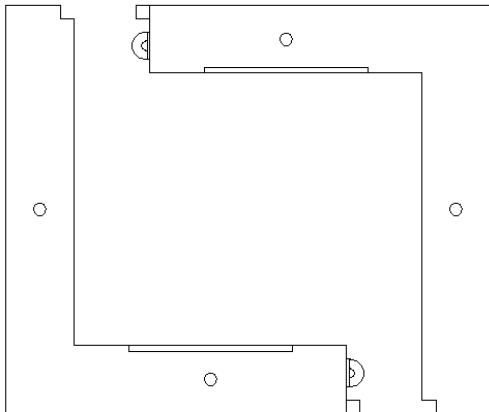


Figura 3.16 – Geometria em “L”

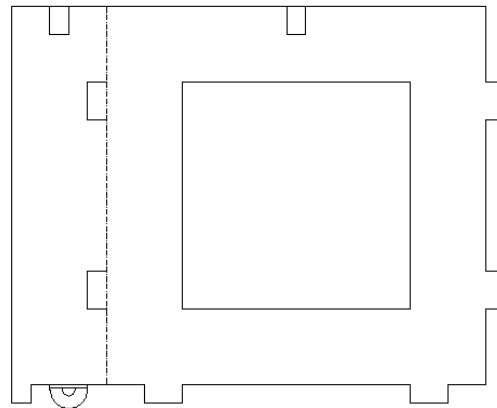


Figura 3.17 – Lateral com presença de reentrâncias

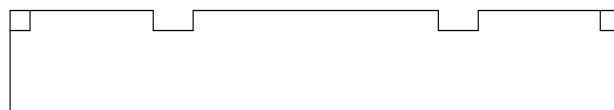


Figura 3.18 – Base com presença de reentrâncias

Visto que os fluídos têm grande facilidade em encontrar caminhos de fuga, foi equacionada uma maneira de limitar as fugas nas arestas livres. Idealizou-se então o uso de isolantes nas arestas de contacto, isolantes estes que não estarão em contacto direto com a pasta, mas apenas entre os elementos cofrantes. Desta forma, não será necessária uma alteração significativa do modelo original, mas, essencialmente, não será mais necessário o uso de silicone nas arestas. O uso do silicone estará limitado apenas à fixação das chapas metálicas, necessárias para a medição de velocidade de ultrassons.

Para maior estabilidade e estanquidade do molde pensou-se na adoção do uso de fechos metálicos, que graças ao seu poder de fecho, permitem compressão dos vários elementos e do isolante, garantindo a estanquidade necessária.



Figura 3.19 – Fechos Metálicos

Como requisito inicial, o molde tem de estar preparado para ser usado em campo; tratando-se o Arduino (explicação do componente eletrónico no próximo capítulo 3.5.2.) de um componente sensível, foi

pensada a criação de uma proteção a este componente. A colocação do novo componente eletrónico terá de estar limitada à tampa, por razões de estabilidade e segurança deste, mas também porque ao Arduino será acoplado um pequeno ecrã LCD, que permite a leitura da temperatura em tempo real, lida pelo sensor de temperatura PT100 posicionado no centro da base. No entanto, também é necessário garantir que a presença da proteção não afeta a presença das redes metálicas de medição da resistividade, tendo-se definido a seguinte geometria:

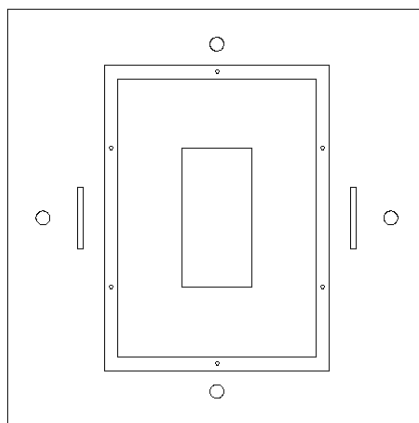


Figura 3.20 – Tampa com proteção do Arduino (Vista superior)

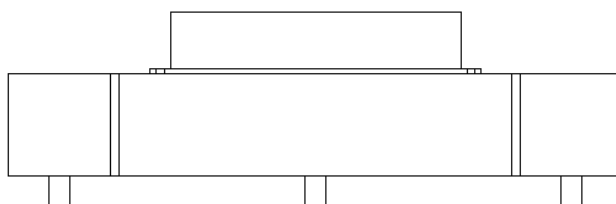


Figura 3.21 – Tampa com proteção do Arduino (Vista frente)

Além das alterações descritas anteriormente, procedeu-se também à redução da base, visto serem dispensados os estabilizadores anteriormente usados, graças ao uso tanto das reentrâncias como dos fechos metálicos. No molde anterior verificava-se que a presença das chapas alterava a geometria do cubo de betão e reduzia também o volume de betão; para este novo molde, adaptaram-se as paredes ao efetuar uns cortes para inserção das chapas, ficando estas alinhadas com o interior da parede e garantindo que nem o volume nem a forma são alteradas.

3.5.2. MEDIÇÃO DE TEMPERATURA E HUMIDADE DE FORMA AUTOMÁTICA

A placa eletrónica Arduino permite a obtenção de uma nova dinâmica, elevando em muito o número de possibilidades a realizar pelo molde. Por razões de falta de tempo e de conhecimento, o estudo do uso do Arduino ficou limitado à leitura e registo dos dados lidos por sensores de temperatura. A eficácia no processamento de dados e de aplicações resultante do uso do Arduino em combinação com as capacidades da nova geometria do molde, que lhe conferem um aumento da sua eficácia térmica, e do automatismo de leitura de dados permitirão uma maior fiabilidade de resultados.

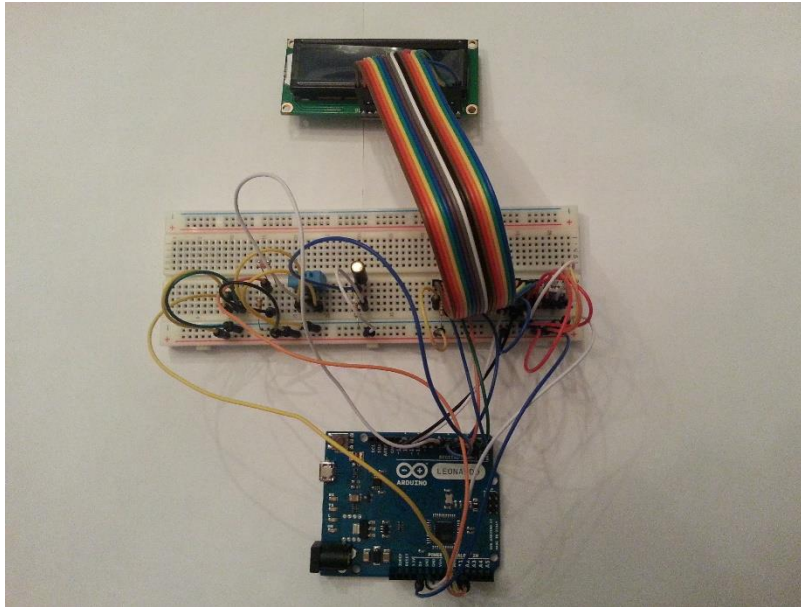


Figura 3.22 – Arduino acoplado com sensores

Este novo componente eletrónico permite reduzir substancialmente o custo e aumentar a praticabilidade do molde, tendo sido uma das maiores conquistas para a dissertação. O modelo anterior estava dependente de um DataTaker que ronda os 3000 euros, dependendo da presença constante deste para efetuar a leitura e registo dos dados, que, graças à sua dimensão significativa e custo elevado, obriga a cuidados superiores. Os preços do Arduíno começam na ordem dos 30 euros na versão mais básica, versão presente no molde, e todos os componentes acoplados como a placa de circuitos, sensores de temperatura e humidade, cabos condutores e resistências são de custo muito reduzido, tendo a versão final do molde custado 60 euros, com todos os elementos incluídos.

Por razões de incompatibilidade, não é possível a acoplação do sensor de temperatura PT100, como usado anteriormente, tendo sido substituído por um sensor de temperatura LM 35. Este sensor de temperatura oferece uma precisão garantida de 0.5°C , uma impedância de $0,1\ \Omega$ e uma amplitude térmica de leitura que vai dos -55 aos 150°C , valores muito superiores aos verificados pelos ensaios realizados, não limitando em nada o novo molde.(Incorporated, T.I., 2013)

Para permitir uma aquisição de dados mais completa, foi também adicionado um sensor de humidade e temperatura DHT11 Digital Humidity, que possibilita o registo da humidade e temperatura ambiente, oferecendo mais informações importantes para uma calibração correta da modelação numérica, aumentando a fiabilidade dos dados registados.

Graças a uma alimentação feita por uma pilha de 9V e a uma memória interna suficiente graças a um cartão de memória SD para registo dos valores obtidos durante as 48 horas de leitura da variação da temperatura, garante-se a autonomia necessária ao molde, sem que haja necessidade de recorrer a outras fontes de leitura e registo de dados como computadores portáteis, ou outros dispositivos como os *Data loggers*.

A programação do Arduíno é de fácil realização, tendo que ser feita previamente através do *software* Arduíno Software IDE, desenvolvido pela própria empresa. A inserção de dados é conseguida de uma maneira relativamente simples, não impondo grandes desafios tanto a nível de compreensão e pesquisa dos dados, graças a uma grande oferta de informações, tanto a nível de bibliotecas como fóruns.

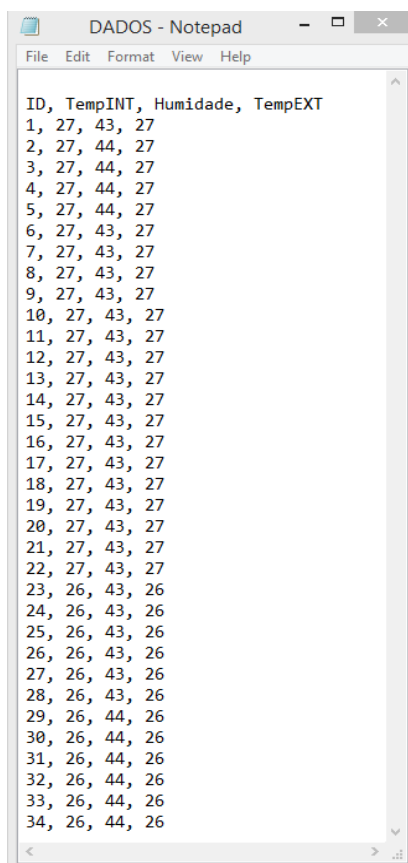
Tendo em conta estas facilidades, foi então possível chegar ao código de dados final seguinte apresentado em Anexo.



Figura 3.23 – Ecrã LCD de 16 pinos

Este código de dados permite a leitura automática dos sensores acoplados a partir do Arduino, a visualização em tempo real no ecrã LCD de 16 pinos acoplado, e, o mais importante, a possibilidade de registo dos dados obtidos num ficheiro de texto na memória interna de todas as medições ao longo das 48 horas, ou o tempo necessário. O ficheiro de texto criado com a terminação “.csv” (Comma separated values), permite uma leitura simples em programas de edição de dados como o Excel, facilitando a geração de gráficos de variação da temperatura como os estudados na presente dissertação.

De seguida é apresentado um exemplo da leitura de dados a obter nas figuras 3.24 a) e 3.24 b).



a)

ID	Hora	TempINT	Humidade	TempEXT
1	00:00:00	27	43	27
2	00:00:30	27	44	27
3	00:01:00	27	44	27
4	00:01:30	27	44	27
5	00:02:00	27	44	27
6	00:02:30	27	43	27
7	00:03:00	27	43	27
8	00:03:30	27	43	27
9	00:04:00	27	43	27
10	00:04:30	27	43	27
11	00:05:00	27	43	27
12	00:05:30	27	43	27
13	00:06:00	27	43	27
14	00:06:30	27	43	27

b)

Figura 3.24 – a) Registo de dados em ficheiro .csv ; b) Registo de dados em Excel

4 ENSAIOS

4.1. ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO MOLDE

Com base nos moldes desenvolvidos por (Caetano, H.F.d.S., 2013), realizou-se um ensaio que permitisse uma melhor interpretação do comportamento térmico dos moldes e o desenvolvimento das capacidades de manuseamento, montagem e programação dos diversos componentes necessários à leitura dos dados.

Para o estudo da caracterização do molde, foi pensado um estudo que consistia em encher os 4 moldes existentes (HCS,HCA,HCB,HCC) com água previamente aquecida, verificar o decréscimo da temperatura ao longo do tempo, e desta forma, conseguir uma melhor interpretação do isolamento térmico.

O equipamento necessário para este ensaio foi: cinco moldes (quatro moldes para o estudo da água e um para o controlo da temperatura ambiente), um aquecedor de água, um DataTaker DT 505 para o registo da temperatura, e um computador portátil para programação e registo dos dados obtidos.



Figura 4.1 – Aquecedor de Água

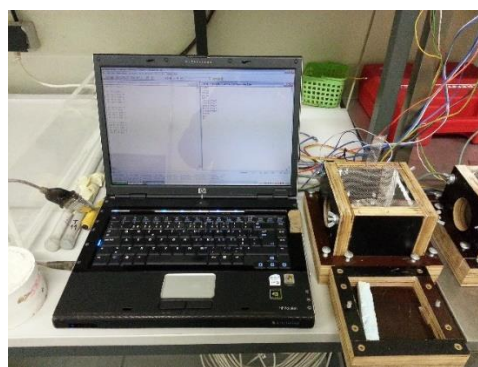


Figura 4.2 – Computador Portátil



Figura 4.3 – DataTaker DT 505

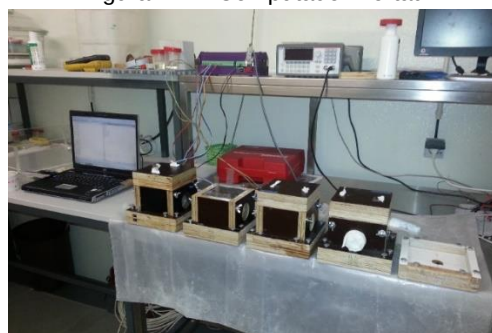


Figura 4.4 - Disposição dos vários elementos

Para o estudo do comportamento do molde fez-se a comparação de várias situações, tais como, o efeito da presença da tampa na fuga de calor, a presença de isolantes nas chapas de medição dos ultrassons (visto serem um ponto de fuga) e por último a comparação entre moldes iguais.

Para simplificação de inserção de dados no programa do DataTaker foram adotadas as seguintes denominações:

- Molde HCS – Série S1 – Molde com tampa
- Molde HCC – Série S2 – Molde sem tampa
- Molde HCA – Série S3 – Molde sem malhas metálicas
- Molde HCB – Série S4 – Molde com tampa e com isolamento nos orifícios para chapas metálicas
- Molde HC – Série S5 – Apenas base (temperatura ambiente)

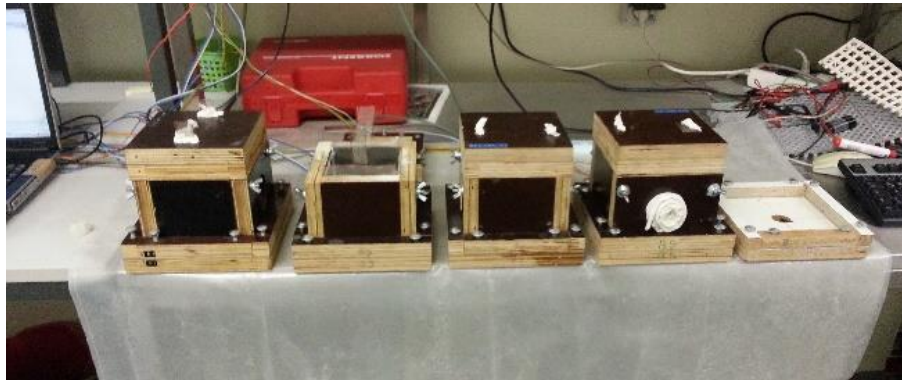


Figura 4.5 – Cinco Moldes

Supondo que os moldes são todos idênticos, fizeram-se então 3 comparações:

- S1 Vs S2 - Eficácia da tampa;
- S1 Vs S3 – Presença das malhas metálicas;
- S1 Vs S4 - Controlo de temperatura na zona de maior perda (chapas metálicas).

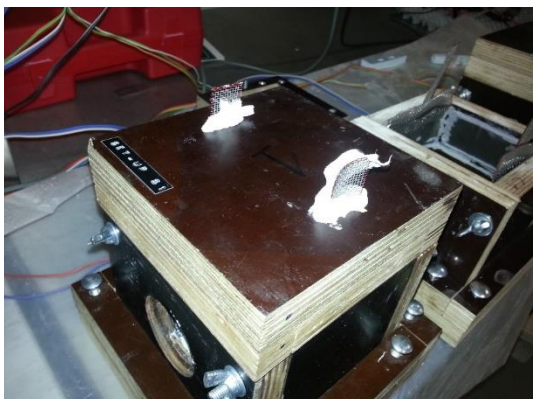


Figura 4.6 - Molde HCS (série S1) com isolamento na zona das malhas metálicas

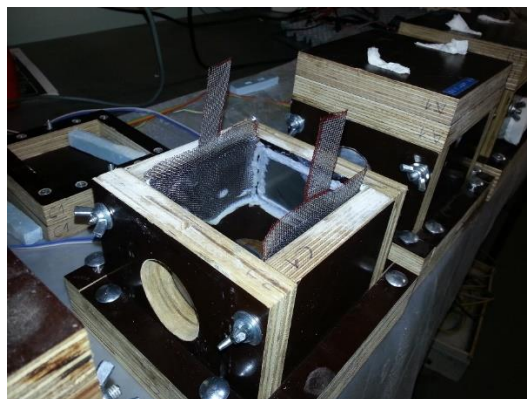


Figura 4.7 - Molde HCC (série S2) sem tampa



Figura 4.8 - Molde HCA (série S3) com isolamento de papel na tampa

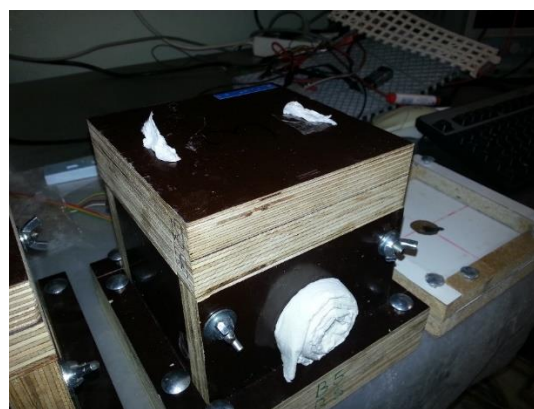


Figura 4.9 - Molde HCB com isolamento de papel na tampa e nas aberturas junto às chapas metálicas

O estudo foi realizado da seguinte maneira:

- 1) Montagem e selagem (silicone branco) dos moldes;
- 2) Ligação dos moldes ao equipamento de leitura e registo DataTaker;
- 3) Programação do DataTaker no computador portátil;
- 4) Fez-se correr o programa até se garantir temperatura igual em todos os moldes e igual à temperatura ambiente;
- 5) Aqueceu-se a 50° C a água, com ajuda do aquecedor de água;
- 6) Encheu-se, com 1 litro de água quente, o molde HCS, fechou-se a tampa e selaram-se com papel os orifícios de saída das malhas metálicas;
- 7) Encheu-se, com 1 litro de água quente, o molde HCC;
- 8) Encheu-se, com 1 litro de água quente, o molde HCA, fechou-se a tampa e taparam-se os orifícios da tampa com papel;

- 9) Encheu-se, com 1 litro de água quente, o molde HCB, fechou-se a tampa, taparam-se os orifícios da tampa com papel e isolaram-se as aberturas junto às chapas com papel (isolante disponível).
- 10) Após esta montagem deixou-se correr o programa com leituras a cada 30 segundos durante aproximadamente 23 horas, altura em que foi visível que a temperatura estabilizou.

Com base nos dados obtidos pelo DataTaker fez-se a montagem destes numa folha de cálculo em Excel, obtendo-se curvas da evolução da temperatura com o tempo, representadas na figura 4.10.

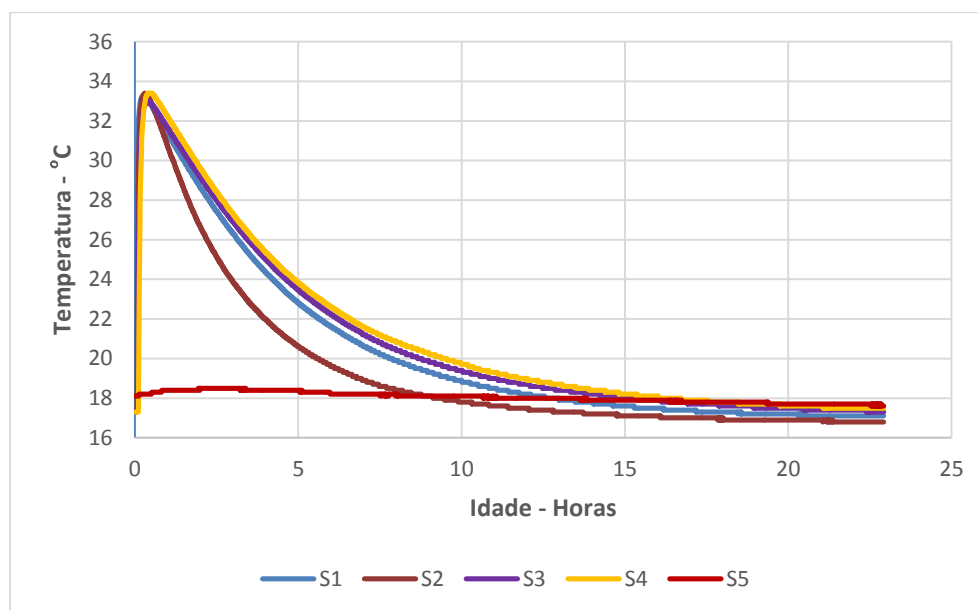


Figura 4.10 – Gráfico de Variação de Temperatura

Nos gráficos da figura 4.10 é possível visualizar a variação da temperatura dos moldes ao longo de todo o ensaio, visto que se trata de um ensaio longo, e a estabilização da temperatura deu-se relativamente cedo, não permitindo grande interpretação das diferenças entre moldes.

Para melhor visualização, encurtou-se a duração dos ensaios. Desta maneira é perceptível a diferença entre estes, em especial a grande diferença entre a presença da tampa no comportamento térmico. A decisão da leitura dos dados até às 9 horas deve-se ao facto de este ser o ponto de estabilização da temperatura.

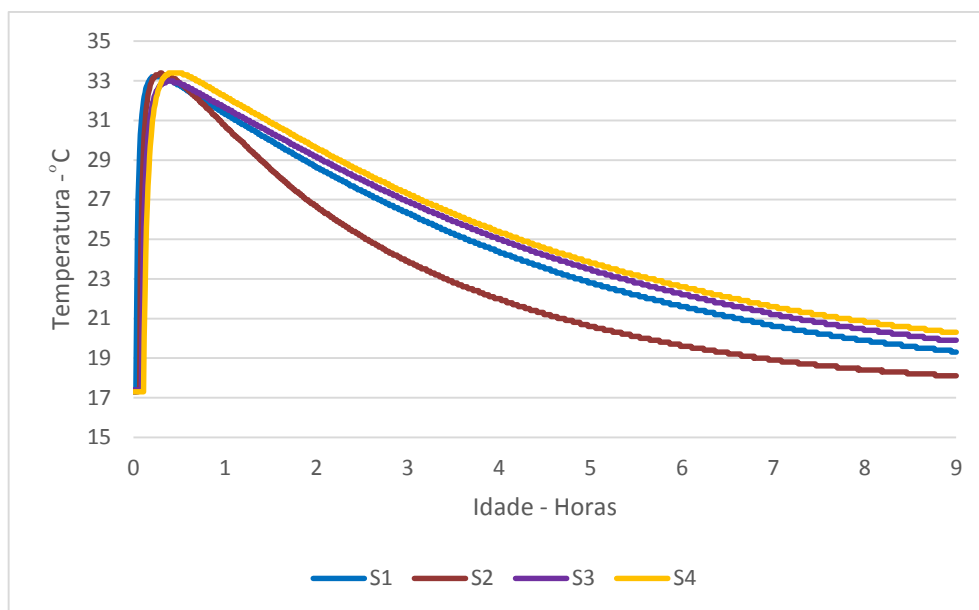


Figura 4.11 – Gráfico de Comparação de comportamentos

É notório o efeito da ausência da tampa no molde HCC (série S2), em que a temperatura se manteve sempre inferior ao longo do tempo, e apresentando um decréscimo de temperatura superior ao longo do tempo. Diferenças entre os moldes HCS (série S1) e o molde HCA (série S3) mostram um isolamento do molde HCS inferior ao HCA, justificado por uma condução do calor pelas malhas metálicas para o exterior. Diferenças entre o molde HCS (série S1) e o molde HCB (série S4) justificadas pelo melhor isolamento, devido ao uso de papel na zona de maior perda de calor (chapas), desta maneira aumentando as condições de isolamento térmico. Um facto verificado de grande importância é o efeito da evaporação, que levou além da redução do nível de água em todos os moldes e também à presença de água condensada nas tampas. Este facto foi notório, principalmente no molde HCC (série S2), em que a curva da temperatura final foi claramente inferior à dos outros moldes.

4.2. ENSAIOS DE RAZÃO DE ÁGUA CIMENTO DE PASTAS

4.2.1. OBJETIVOS

Um dos aspetos mais importantes da presente dissertação consiste numa boa caracterização térmica de diferentes razões de água cimento em pastas, assim como o processo de hidratação do cimento. Para melhor caracterizar o efeito que diferentes razões de água-cimento têm na libertação de calor, foram realizados ensaios em condições controladas, que permitem uma boa leitura deste comportamento através da variação da temperatura no molde, que consiste na energia libertada pela reação química do cimento com a água.

A complementar o ensaio do comportamento térmico, realizaram-se os ensaios de resistividade e da velocidade de ultrassons, para melhor compreender o efeito que a variação das razões de água-cimento, têm na resistência final das amostras.

Os resultados obtidos pelos diversos ensaios permitem gerar curvas da evolução da temperatura na base das amostras, assim como curvas da evolução da resistividade e da velocidade de ultrassons. Posteriormente será feita uma comparação dos resultados obtidos pelo ensaio do comportamento térmico com a modelação numérica, para melhor compreender a aplicabilidade de uma modelação neste problema.

A presente secção vai estar dividida primeiramente numa descrição das misturas das pastas estudadas e a metodologia de ensaios, sendo finalizado com os resultados obtidos e conclusões dos ensaios realizados.

4.2.2. TIPOS DE MISTURA E METODOLOGIA DE ENSAIO

Para a seleção das misturas teve-se em consideração um grupo de amostras que permitissem uma interpretação mais vasta do efeito que a razão água-cimento tem no comportamento térmico, sem desta maneira limitar as propriedades necessárias das pastas, como resistências mecânicas e trabalhabilidade. Desta maneira, foram então escolhidas razões de água cimento entre os valores de 0,3 e 0,6.

Os constituintes utilizados nas amassaduras das pastas foram:

- Cimento (CEM I 42,5 R) da Secil-Maceira com uma densidade de 3160 kg/m³;
- Fíler Calcário (BETOCARB P1 – OU) da Comital com 2680 kg/m³;
- Superplastificante (ViscoCrete 3005) da SIKa com uma densidade de 1050 kg/m³;
- Estabilizador (VP 1) da SIKa.

De maneira a garantir o maior controlo das condições dos ensaios, assim como estabilidade de temperatura da pasta na fase de entrada no molde logo a seguir à amassadura, todos os constituintes foram transportados para a sala de amassadura com 24 horas de antecedência.

De seguida apresenta-se os constituintes das misturas para as pastas ensaiadas:

Tabela 4.1 – Composições das Pastas

	A/C = 0,3	A/C = 0,4	A/C = 0,5	A/C = 0,6
	Volume = 1,5 lt	Volume = 1,5 lt	Volume = 1,5 lt	Volume = 1,5 lt
Cimento	1,638 kg	1,127 kg	0,922 kg	0,827 kg
Fíler Calcário	0,737 kg	1,176 kg	1,352 kg	1,434 kg
Superplastificante	0,031 kg	0,031 kg	0,031 kg	0,031 kg
Água 1 (81% Água Total)	0,537 lt	0,537 lt	0,537 lt	0,537 lt
Água 2 (19% Água Total)	0,134 lt	0,134 lt	0,134 lt	0,134 lt
Estabilizador	0,000 kg	0,000 kg	0,005 kg	0,005 kg

Para a preparação da amassadura das diferentes pastas procedeu-se ao seguinte procedimento:

- 1) Recolha e pesagem dos vários constituintes segundo as composições a seguir descritas na Tabela 4.1;
- 2) Mistura dos Agregados Finos, Cimento, Fíler calcário e 81% da Água durante 60 segundos a velocidade lenta na misturadora;

- 3) Retirada do material aderente às paredes e à pá da misturadora;
- 4) Mistura durante 60 segundos a velocidade lenta;
- 5) Adiciona-se os restantes 19% da Água e o Superplastificante, misturando-se por mais 60 segundos a velocidade lenta;
- 6) Retirada do material aderente às paredes e à pá da misturadora, retomando-se uma mistura de 30 segundos a velocidade lenta;
- 7) Aguardar 5 minutos em repouso;
- 8) Mistura durante 30 segundos a velocidade rápida.

Para melhor controlo da evolução da reação química da hidratação do cimento, assim como para garantir a maior fiabilidade possível aos ensaios, fez-se o registo da hora do momento da primeira mistura dos constituintes das pastas. Logo após à amassadura procedeu-se a um Ensaio de Espalhamento com recurso a um mini-cone de Kantro (Figura 4.12), com a intenção de obter uma boa interpretação da sua trabalhabilidade através da sua fluidez.

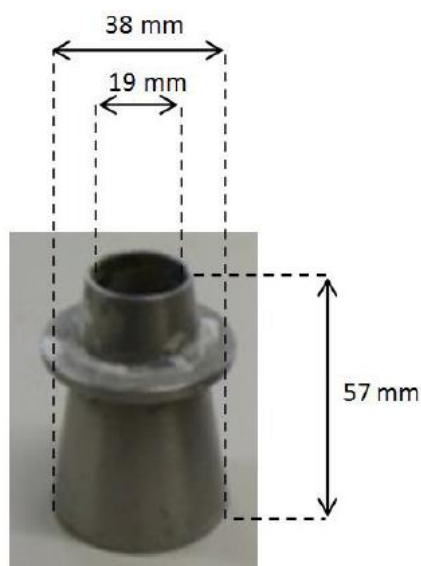


Figura 4.12 – Mini-cone de Kantro para Ensaio de Espalhamento

O resultado esperado será um espalhamento circular com um diâmetro de espalhamento suficiente tal como na Figura 4.13, caso contrário, no caso de se obter uma área de espalhamento não circular como na Figura 4.14, verifica-se uma trabalhabilidade inadequada, sendo necessário mudar os constituintes da pasta.



Figura 4.13 – Trabalhabilidade Adequada



Figura 4.14 – Trabalhabilidade inadequada (Caetano, H.F.d.S., 2013)

Durante o processo de amassadura verificou-se que, para as amostras de razão de água cimento de 0,5 e 0,6, houve a necessidade de acrescentar 5 gramas de estabilizador (VP 1), pois não se verificaram as qualidades de trabalhabilidade necessárias. Os resultados obtidos no ensaio de espalhamento nas pastas estudadas estão apresentados na Tabela 4.2. É visível o aumento do diâmetro de espalhamento com o aumento da razão água cimento, tal como esperado.

Tabela 4.2 – Ensaio de Espalhamento

Amostra	A/C = 0,3	A/C = 0,4	A/C = 0,5	A/C = 0,6
Diâmetros de Espalhamento	115 / 114 (mm)	157 / 165 (mm)	171 / 197 (mm)	182/ 203 (mm)



Figura 4.15 – Ensaio de Espalhamento com uso de Mini-cone de Kantro

Imediatamente a seguir ao Ensaio de Espalhamento procede-se ao enchimento do molde com a pasta, tal como se pode verificar na Figura 4.16 e Figura 4.17, assim como o registo da hora de entrada desta no molde, de maneira a não se perder o registo da evolução da temperatura devido às primeiras reações químicas da hidratação do cimento.

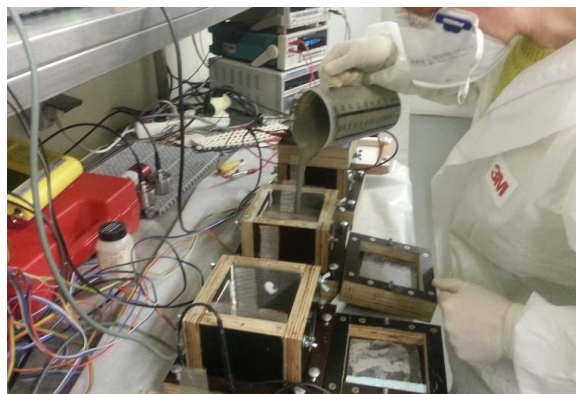


Figura 4.16 – Enchimento dos Moldes

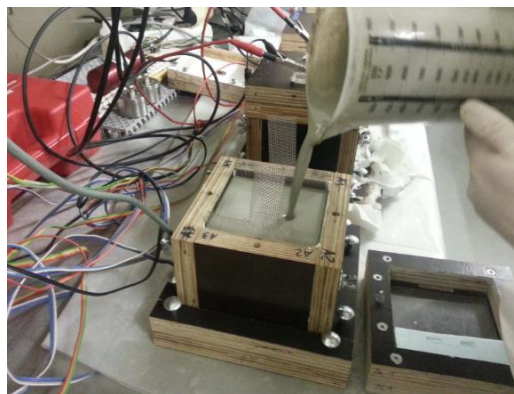


Figura 4.17 – Enchimento dos moldes

Tabela 4.3 – Data e Hora de Amassadura e Entrada da pasta no Molde

Amostra	Molde	Data e Hora Amassadura	Data e Hora Molde
A/C=0.3	HCC	18/03/2014 09:29	2014/03/18 9:50:00
A/C=0.4	HCB	18/03/2014 10:19	2014/03/18 10:39:00
A/C=0.5	HCS	18/03/2014 11:00	2014/03/18 11:00:00
A/C=0.6	HCA	18/03/2014 12:41	2014/03/18 12:00:00

O fecho tem de ser feito com cuidado de maneira a não desprender as malhas metálicas das paredes, e comprometer a leitura da resistividade, assim como é também necessária a colocação de papel nos orifícios de maneira a limitar a fuga de calor pelos mesmos.

O processo de leitura e registo das temperaturas dos moldes e da temperatura será automático durante as 48 horas do ensaio, graças ao uso do aparelho eletrónico DataTaker DT 505, previamente programado.

4.2.3. RESULTADOS

Os ensaios foram realizados com sucesso, tendo permitido o registo da variação da temperatura nos vários moldes ao longo do tempo, assim como uma caracterização do processo de hidratação do cimento, graças às variações da temperatura que se podem ser relacionadas com os períodos de libertação de calor, como será apresentado de seguida. As leituras da resistividade e ultrassons das várias razões de água cimento, permitiram compreender a evolução do endurecimento da pasta, assim como as diferenças de resistência esperadas entre amostras.

Na Figura 4.18, é possível visualizar a evolução da temperatura dos vários moldes e também da temperatura ambiente. Verifica-se que temperatura ambiente praticamente não varia ao longo de todo o ensaio, o que permite fazer a interpretação que a sala do laboratório em que o ensaio foi realizado garante condições constantes e necessárias para melhor interpretação e fiabilidade dos resultados obtidos.

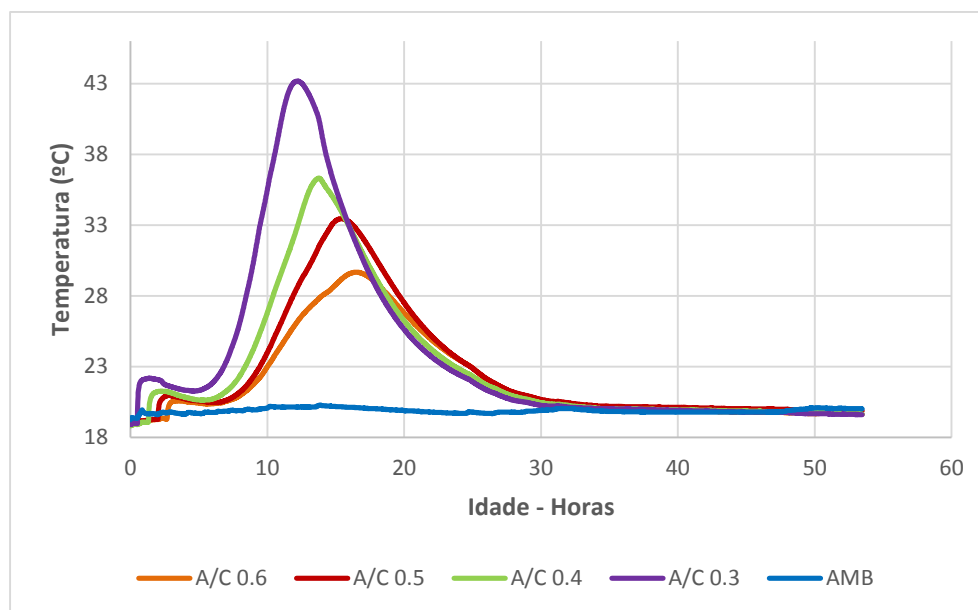


Figura 4.18 - Variação das Temperaturas dos Moldes

A Figura 4.18 permite que se conclua dois factos, um de que quanto maior for a quantidade de cimento na pasta maior será a temperatura máxima registada, e também que este ponto de temperatura máxima ocorre ligeiramente mais cedo, em comparação com as razões de água cimento maiores. Verifica-se ainda que a quantidade de calor total libertada, varia em função da quantidade de cimento para as pastas com diferentes razões de água cimento.

As curvas de temperatura obtidas podem ser comparadas com as curvas de libertação de calor gerado, como estudadas anteriormente. Desta comparação é possível compreender melhor a sua variação, e a localização dos seus pontos mais característicos, como o ponto de temperatura máximo, que está dentro dos valores característicos para um cimento 42,5 R, tal como na Figura 2.5.

Como se pode verificar na comparação da Figura 2.1, é possível verificar os vários períodos de libertação de calor, sendo confirmada a curva teórica defendida por Ferreira, D.C.S. (2009).

Na tabela seguinte, faz-se uma análise do ponto de temperatura máxima dos gráficos obtidos, tanto do valor máximo, como da idade em que esta acontece. Esta comparação permite perceber melhor o efeito da quantidade de cimento na reação de geração de calor, e a velocidade de libertação deste.

Tabela 4.4 – Valores Característicos das Curvas de Temperatura

Amostra	Idade (h)	Temperatura Máx. (°C)
A/C=0.6	13:44	29.7
A/C=0.5	13:41	33.5
A/C=0.4	12:25	36.3
A/C=0.3	11:41	43.2

Tal como foi afirmado por Silva, B.J.M.d. (2005), o Ensaio da Resistividade veio a confirmar que com a redução da razão água cimento, a resistividade aumenta. Este facto deve-se ao facto de haver menos cimento para reagir com a água, sendo a condução da energia na água inferior à dos outros constituintes das pastas.

A variação da resistividade ao longo do tempo também provou que com a redução da quantidade de água, e por sua vez, o aumento do endurecimento da peça, a resistividade aumenta. Este facto é notório ao longo das 48 horas do ensaio, notando-se diferenças significativas entre medições, principalmente nos períodos de tempo maiores, que coincidem com as noites em que não é possível proceder à medição.

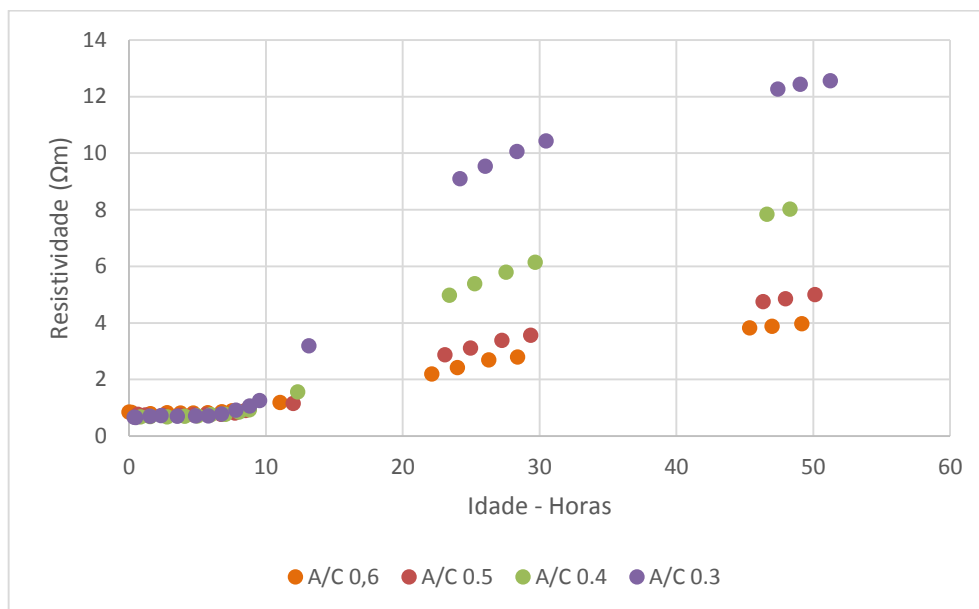


Figura 4.19 – Variação de Resistividades

Tabela 4.5 – Valores máximos de Resistividade medidos

AMOSTRA	Resistividade (kΩcm)
A/C=0.6	3.98
A/C=0.5	5.01
A/C=0.4	8.20
A/C=0.3	12.56

Com base nos valores máximos registados nos ensaios, presentes na Tabela 4.5, é possível verificar que a amostra com razão de água cimento de 0,3 apresenta valores de resistividade ao fim de 48 horas, 3,16 vezes superiores em comparação com a amostra de razão de água cimento de 0,6. Graças a estes valores, e à relação entre os valores da resistividade com a resistência mecânica das pastas, podemos concluir que a resistência mecânica aumenta com a diminuição da razão de água cimento, tal como seria esperado.

Como é possível verificar na Figura 4.20, o ensaio dos ultrassons não apresenta resultados totalmente coerentes ao longo do tempo. A razão da discrepância de valores ao longo do tempo deve-se a problemas de leitura durante o ensaio, por razões ainda não totalmente compreendidas, mas que se assume que estarão relacionadas com a aplicação e secagem do produto ligante (gel), assumindo-se que as más condições de contacto dos transdutores com as chapas metálicas, leve a uma deficiente leitura das velocidades.

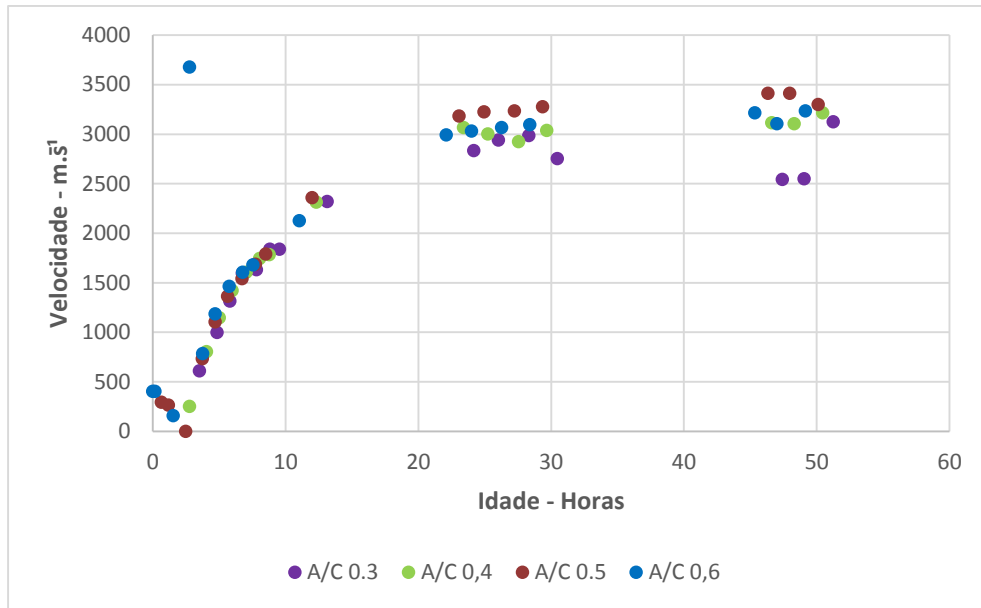


Figura 4.20 – Variação de Ultrassons

Os resultados esperados seriam um aumento da velocidade de propagação de ultrassons com a redução da água, como na Figura 4.21, devido à maior velocidade de propagação de ondas num meio mais sólido, garantido pelo endurecimento da pasta. Relacionado com este resultado, também as razões de água cimento deveriam levar às mesmas conclusões- quanto maior fosse a quantidade de cimento, maior seria esperada a velocidade de transmissão de ultrassons- facto que não é possível verificar nas medições realizadas.

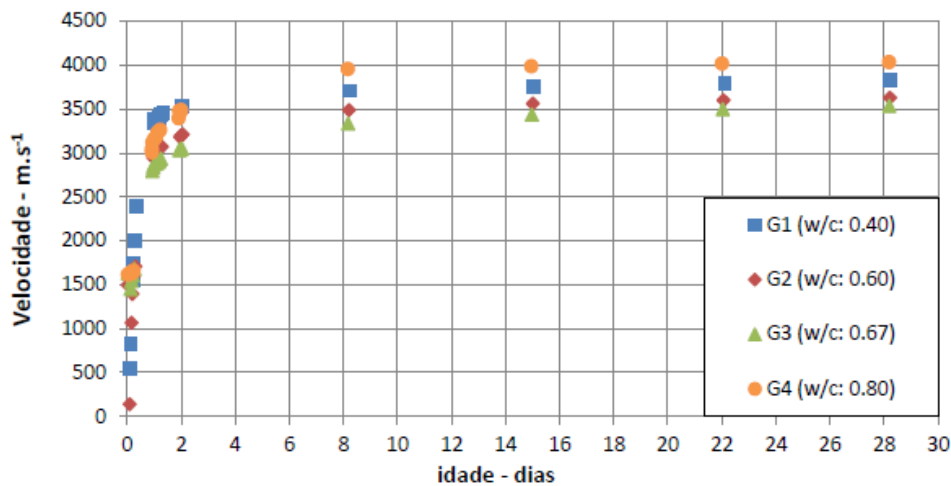


Figura 4.21 – Ensaio de Ultrassons ao longo do tempo (Caetano, H.F.d.S., 2013)

Como resumo final, apresenta-se uma tabela com os principais resultados, que mostram uma maior variação de temperatura, uma resistividade máxima superior, e uma discutível velocidade de ultrassons superior, para a amostra ensaiada de razão água cimento de 0,3. Portanto, uma pasta com uma quantidade de cimento bastante superior, com uma trabalhabilidade satisfatória como foi provado no Ensaio de Espalhamento, garante uma resistência mecânica bastante superior, assim como um endurecimento ligeiramente mais rápido.

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados

AMOSTRA	MOLDE	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Variação da Temperatura (°C)	Resistividade Máxima (kΩcm)	Ultrassons Máximo
A/C=0.6	HCC	29.67	19	10.67	3.975	27.2
A/C=0.5	HCB	33.46	18.98	14.48	5.007	29.3
A/C=0.4	HCS	36.32	18.8	17.52	8.196	31.1
A/C=0.3	HCA	43.18	18.89	24.29	12.556	32

Conforme foi previamente detalhado, a razão de água cimento constitui um dos parâmetros mais relevantes na geração de calor. Deste modo pretendeu-se propor uma relação linear entre a temperatura e a razão água cimento que pudesse auxiliar um utilizador futuro a prever com alguma fiabilidade a temperatura que seriam atingidas mediante a razão previamente escolhida.

Na Figura 4.22 a relação linear é dada pela razão de água cimento e a temperatura máxima gerada. Graças a esta regressão linear é possível obter com bastante precisão (visto ter sido obtida uma dispersão de 96%) a temperatura máxima esperada para razões de água cimento dentro dos valores estudados.

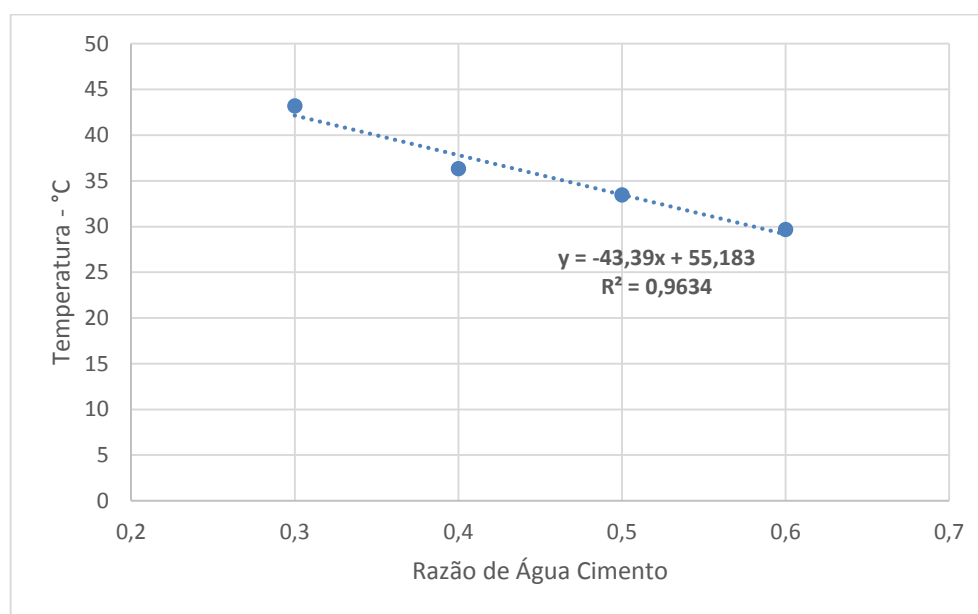


Figura 4.22 – Relação entre Razão Água Cimento e Temperatura Máxima

Outra relação estudada foi entre o integral da curva de temperatura obtida com a razão de água cimento. Desta maneira obtém-se uma aproximação da quantidade de calor gerado, visto que a temperatura é devida à geração de calor. Esta relação permite, através da razão de água cimento, uma relação com o aumento de temperatura, e assim proceder a uma interpretação bastante fiável, graças a uma dispersão de 96% também, do calor gerado expectável.

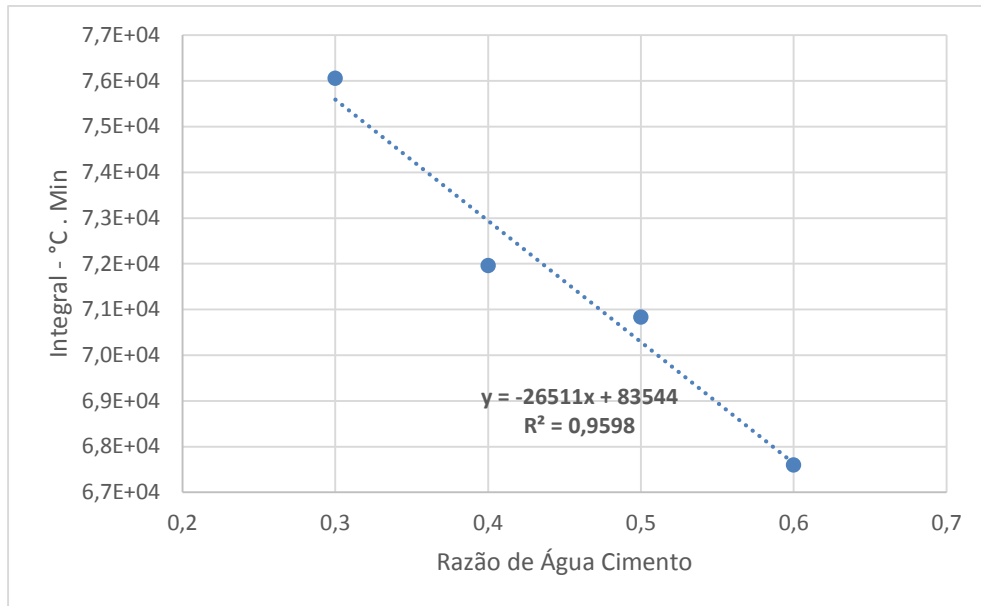


Figura 4.23 – Relação entre Razão de Água Cimento e Integral de Curvas de Temperatura

As relações propostas permitem interpretações tanto a nível de propor tanto o integral esperado assim como a temperatura máxima, como também podem ser aplicadas num estudo de qualidade. O estudo de qualidade baseia-se em um estudo rápido e simples, graças ao molde desenvolvido, fazer um estudo da razão água cimento, e desta maneira confirmar se o betão em estudo garante as condições necessárias.

Graças a uma interpretação rápida dos dados obtidos tanto pela temperatura como da resistividade, é possível confirmar tanto pela temperatura máxima como do integral da curva de temperatura, obter a razão de água cimento, e por sua vez as misturas do betão em estudo.

4.3. ENSAIOS DE ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO

4.3.1. OBJETIVOS

O presente capítulo vem no seguimento de um programa de desenvolvimento de argamassas e betões de alto desempenho, desenvolvido pela Professora Doutora Sandra Nunes no âmbito do projeto Betofibra, e nomeadamente no trabalho de dissertação de mestrado de outros colegas desenvolvidos em paralelo. O desenvolvimento deste programa de ensaios, mais especificamente o tipo de adições, as suas proporções ou outras variáveis, não são motivo de estudo desta dissertação, apenas tendo sido feito o estudo do comportamento destas misturas nas primeiras idades, graças às potencialidades dos moldes.

O estudo das argamassas foi desenvolvido com o objetivo de compreender a influência que as adições nas argamassas provoca na reação da hidratação do cimento, e compreender os efeitos na produção de calor devido à reação química do cimento com a água. Em complemento, realizou-se o estudo da resistividade e da velocidade de ultrassons que permite uma melhor interpretação dos ganhos na resistência devidos a estas misturas, e ajuda a compreender a velocidade de endurecimento das amostras.

Graças aos quatro moldes disponíveis, foi possível realizar o ensaio da utilização de três diferentes tipos de adições concorrentemente, assim como de uma argamassa de alto desempenho sem adições de referência, para desta maneira melhor interpretar o efeito da presença destas, nas primeiras idades, em comparação com uma mistura de referência.

4.3.2. TIPOS DE MISTURA E METODOLOGIA DE ENSAIO

Visto que o estudo da presença de adições não pertence aos interesses desta dissertação, as misturas utilizadas neste ensaio foram solicitadas aos responsáveis pelo programa de desenvolvimento destas, sendo uma das suas características principais, os resultados no ensaio de espalhamento na ordem dos 30 centímetros, estudo esse realizado previamente por parte de outros.

Os adjuvantes em estudo foram a Sílica de Fumo, o Metacaulino e o Pó de Vidro, tal como se pode verificar nas amostras seguintes:

Tabela 4.7 – Constituição da Argamassa com Sílica de Fumo

Sílica de Fumo	
Volume	1,4 lt
Cimento (CEM I 42.5 R)	1112,86 g
Sílica de Fumo	111,29 g
Filer Calcário	436,00 g
Areia Fina	1427,81 g
Água 1 (80 %)	172,21 g
Água 2 (20%)	43,05 g
Superplastificante 1 (75%)	14,44 g
Superplastificante 2 (25%)	4,81 g
Fibras	0 g

Tabela 4.8 – Constituição da Argamassa com Metacaulino

Metacaulino	
Volume	1,4 lt
Cimento (CEM I 42.5 R)	768,08 g
Metacaulino	256,03 g
Filer Calcário	438,90 g
Areia Fina	1427,81 g
Água 1 (80 %)	229,60 g
Água 2 (20%)	57,40 g
Superplastificante 1 (75%)	20,85 g
Superplastificante 2 (25%)	6,95 g
Fibras	0 g

Tabela 4.9 – Constituição da Argamassa com Pó de Vidro

Pó de Vidro	
Volume	1,4 lt
Cimento (CEM I 42.5 R)	768,08 g
Pó de Vidro	242,55 g
Filer Calcário	606,38 g
Areia Fina	1427,81 g

Água 1 (80 %)	184,80 g
Água 2 (20%)	46,20 g
Superplastificante 1 (75%)	19,40 g
Superplastificante 2 (25%)	6,47 g
Fibras	0 g

Tabela 4.10 – Constituição da Argamassa de Referência

Referência (A/C = 0,32)	
Volume	1,4 lt
Cimento (CEM I 42.5 R)	768,075 g
Pó de Vidro	0 g
Filer Calcário	848,932 g
Areia Fina	1427,807 g
Água	231 g
Superplastificante	25,872 g
Fibras	0 g

A argamassa de referência difere da mistura estudada no capítulo anterior na razão de água cimento de 0,3 pela presença de areia fina, alterando as suas propriedades de uma pasta para uma argamassa, sendo esperados resultados significativamente diferentes, devido à maior percentagem de matéria sólida na mistura, que, como estudado anteriormente, altera a condução da energia tanto no ensaio da resistividade como dos ultrassons.

O facto de se estudar uma argamassa sem adições também permitiu uma comparação do comportamento térmico face à pasta previamente estudada, principalmente para compreender o efeito que a presença da areia fina poderá ter na hidratação do cimento, tanto a nível de quantidade de calor libertado como o efeito retardador que poderá ter.

O procedimento da amassadura das argamassas foi realizado da seguinte maneira:

- 1) Com o uso da misturadora, juntar os finos, agregados e 80% da água e misturar tudo a velocidade lenta durante 150 segundos;
- 2) Remoção do material aderente às paredes e à pá da misturadora;
- 3) Misturar 150 segundos a velocidade lenta;
- 4) Adicionar 75% do Superplastificante e os restantes 20% da água;
- 5) Misturar 150 segundos a velocidade lenta;
- 6) Remoção do material aderente às paredes e à pá da misturadora;
- 7) Adicionar os restantes 25% do Superplastificante e misturar durante 90 segundos a velocidade lenta;
- 8) Misturar durante 120 segundos a velocidade rápida.

Ao longo do presente capítulo serão utilizadas abreviaturas por razões de simplificação, sendo os correspondentes nomes os seguintes:

- MET – Argamassa com Metacaulino;
- PVI – Argamassa com Pó de Vidro;
- SIL – Argamassa com Sílica de Fumo;
- REF – Argamassa de Referência.

Tal como no estudo das pastas, imediatamente a seguir à amassadura realizou-se o ensaio de espalhamento, tendo-se registado os seguintes valores:

Tabela 4.11 – Ensaio de Espalhamento

Amostra	MET	PVI	SIL	REF
Diâmetros de Espalhamento	26.3 / 26 (cm)	27.1 / 27.4 (cm)	24.3 / 25.1 (cm)	28.1 / 28.7 (cm)



Figura 4.24 – Ensaio de Espalhamento de Argamassas

4.3.3. RESULTADOS

Tal como nos Ensaios de Razão de Água Cimento de Pastas, o estudo do comportamento térmico e da resistividade das argamassas de alto desempenho foram um sucesso, obtendo-se resultados que seguem o comportamento esperado para argamassas. Mas, mais uma vez o estudo da velocidade de ultrassons não verificou valores coerentes, apesar de que estes tenham estabilizado na parte final do ensaio, ao contrário dos valores registados no ensaio das pastas cimentícias.

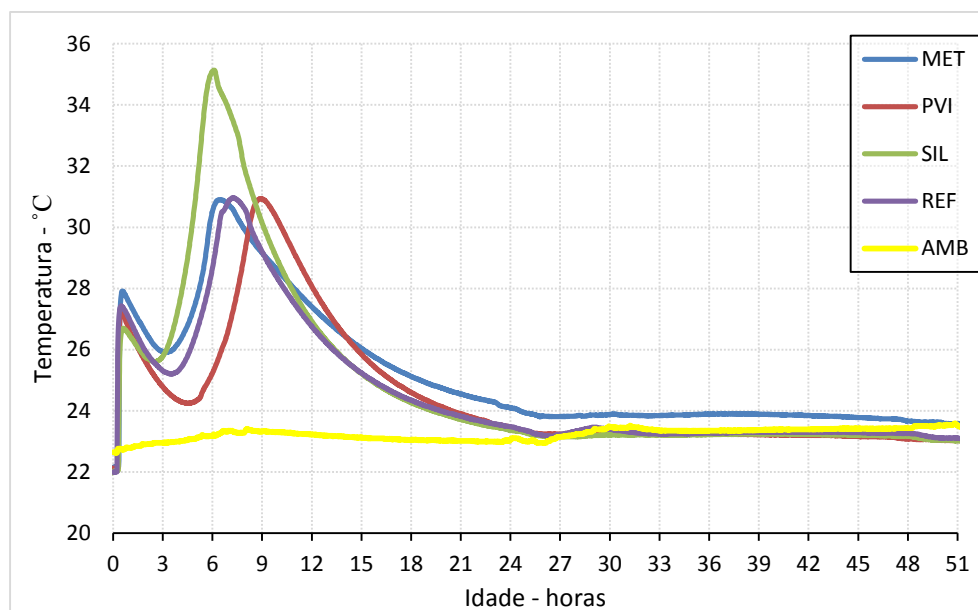


Figura 4.25 – Evolução da Temperatura ao longo do tempo

Tal como dito anteriormente, o ensaio do comportamento térmico foi um sucesso. Conseguiu-se obter curvas completas, que relatam os vários períodos de libertação de calor devidos à reação química da hidratação do cimento, como se pode verificar na Figura 4.25. Registou-se um pequeno decréscimo de temperatura inicial, seguido de uma grande subida da temperatura, como Maekawa, K. [et al.] (1999) indicou na Figura 2.1, seguindo os períodos de libertação de calor de hidratação de cimento. Além do comportamento esperado das argamassas, verificou-se mais uma vez boas condições térmicas da sala de laboratório, com uma amplitude térmica máxima da sala de ensaio de apenas 0,78 °C, valor muito inferior aos possíveis de se sentir em campo.

Para uma melhor compreensão da diferença entre curvas, apresentou-se na Tabela 4.12 a diferença entre razões de água cimento das argamassas, garantindo uma maior facilidade tanto na justificação e interpretação da diferença entre temperaturas máximas obtidas nas amostras ensaiadas.

Tabela 4.12 – Razões de Água Cimento

AMOSTRA	A/C
MET	0,37
PVI	0,30
SIL	0,19
REF	0,32

Na tabela seguinte apresenta-se os valores máximos de temperatura das argamassas atingidos nos vários moldes, assim como as respetivas idades. Esta tabela permite uma melhor interpretação tanto da temperatura máxima atingida, como da velocidade de reação da hidratação do cimento, principais características da hidratação do cimento. Verificaram-se grandes diferenças entre as várias misturas, podendo-se dar especial atenção à argamassa com adição de pó de vidro. Esta adição provocou um efeito retardador de mais de 1 hora, em comparação com a argamassa de referência, do pico da curva de temperatura registado. Por outro lado as outras misturas, Metacaulino e a Sílica de fumo, apresentaram

comportamentos contrários, proporcionando características aceleradoras à reação de hidratação do cimento, e respetiva produção de calor.

Tabela 4.13 - Valores Característicos das Curvas de Temperatura

Amostra	Idade (h)	Temperatura Máx. (°C)
MET	06:10	30,91
PVI	08:35	30,94
SIL	05:49	35,13
REF	06:56	30,96

O facto da amostra com adições de sílica de fumo apresentar uma temperatura máxima superior, na ordem dos 4°C, pode ser justificada pela superior razão de água cimento, visto que esta mistura apresenta uma razão de água cimento de 0,2, devido a uma quantidade de cimento significativamente superior às outras misturas. Mas apesar da maior quantidade de cimento face às outras argamassas, segundo Neville, A.M. (1995) a sílica de fumo provoca uma aceleração da hidratação do cimento, que pode justificar uma diferença de aproximadamente 1 hora entre os picos das curvas de temperatura face à argamassa de referência, assim como o aumento da temperatura máxima.

Uma das conclusões mais importantes dos ensaios realizados, advém da interpretação da curva da argamassa de referência, em que se verifica que a presença da areia fina provoca um decréscimo significativo da temperatura máxima, como se pode verificar na Figura 4.18 e na Tabela 4.4 (tabela das pastas).

O decréscimo da temperatura máxima registada foi de 12,22°C apresentando uma redução de 39,5%, enquanto que a idade do pico da curva de temperatura foi reduzida em 4:45 horas, que consiste numa redução de 59% do tempo de reação do cimento. Estas diferenças que se podem verificar na Tabela 4.14, devem-se à presença de aglomerados na mistura, que provocam uma redução da produção de calor.

Tabela 4.14 – Comparação entre A/C = 0,3 e Argamassa de Referência

Amostra	Idade (h)	Temperatura Máx. (°C)
A/C=0.3	00:11:41	43.18
REF	00:06:56	30.96
Diferença	00:04:45	12.22
Diferença (%)	41%	28%

Também se verifica que a reação é significativamente mais rápida, visto que o pico de temperatura da argamassa de referência se apresenta perto das 7 horas, enquanto na pasta de razão água cimento de 0,30, a pasta mais similar à argamassa em estudo, apresenta um pico de temperatura perto das 12 horas.

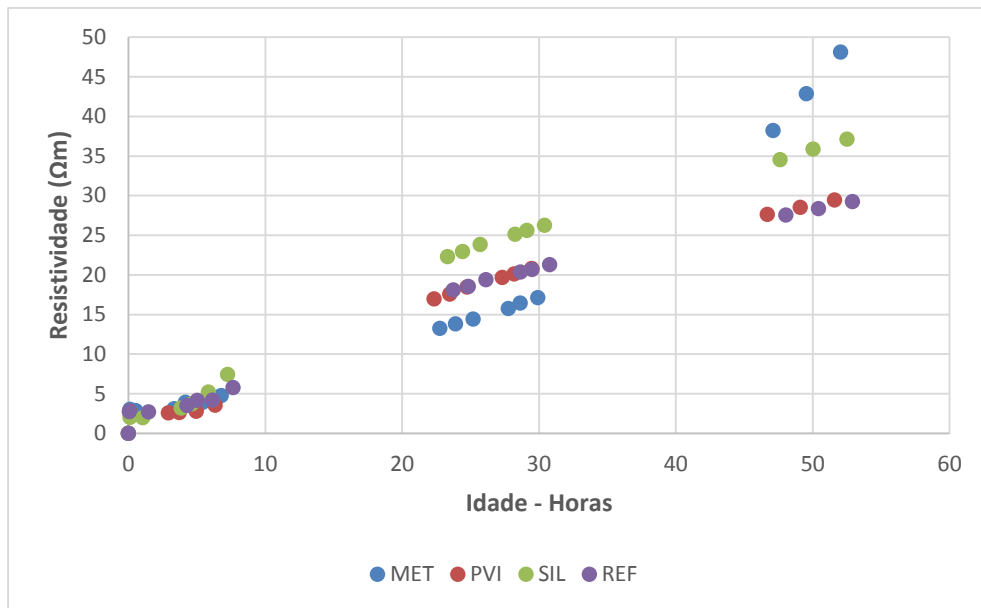


Figura 4.26 – Evolução da Resistividade

O estudo da evolução da Resistividade mostrou grande semelhança entre as argamassas no endurecimento ao longo do tempo, apesar de uma notória diferença entre os resultados obtidos entre misturas. As diferenças são praticamente lineares, notando-se desde o início uma grande semelhança entre a argamassa de referência e a argamassa com pó de vidro, mantendo-se praticamente iguais ao longo de todo o ensaio.

As principais diferenças apresentam-se na variação da resistividade nas argamassas devidas à adição tanto do Metacaulino como da Sílica de fumo. A argamassa com adições de Sílica de fumo apresentou valores de resistividade superiores nas primeiras horas, devendo-se principalmente à maior quantidade de cimento na mistura, desta maneira aumentando o material sólido, e assim facilitando a transmissão da energia.

A adição de Metacaulino à argamassa provocou um significativo aumento da resistividade nas últimas horas de estudo, condição não esperada devido à menor razão de água cimento apresentada, principalmente porque após o primeiro dia de estudo, esta mistura apresentava os menores valores de resistividade. Registou-se um grande aumento na segunda metade do ensaio, devido às propriedades físicas do Metacaulino que facilita a condução da energia transmitida ao provete, e assim obtendo valores de resistividade superiores.

Como conclusão do estudo da resistividade, apresenta-se em seguida uma tabela com os valores máximos registados no ensaio, mostrando-se um aumento de 64% da resistividade na mistura com Metacaulino face à argamassa de referência, e um aumento de 27% no caso da sílica de fumo. Pode-se então fazer a conclusão que estas duas adições foram muito benéficas em comparação com uma argamassa sem adições, graças a um grande aumento da resistividade, que pode ser traduzido num aumento da resistência mecânica final.

Tabela 4.15 – Valores máximos de Resistividade medidos às 48 horas.

Amostra	Resistividade ($k\Omega cm$)
MET	48,13
PVI	29,46
SIL	37,15
REF	29,23

O ensaio de velocidade de ultrassons foi realizado mais uma vez segundo todas as regras, e executado nas condições habituais, seguindo os processos estipulados, mas não apresentou os valores esperados.

Ao contrário dos resultados obtidos nas medições das várias amostras, tal como é possível visualizar na figura seguinte, o esperado seria um aumento gradual da velocidade de ultrassons ao longo do tempo, tal como no ensaio da resistividade. Este aumento estaria proporcional ao aumento do endurecimento, assim como um aumento da resistência com o tempo.

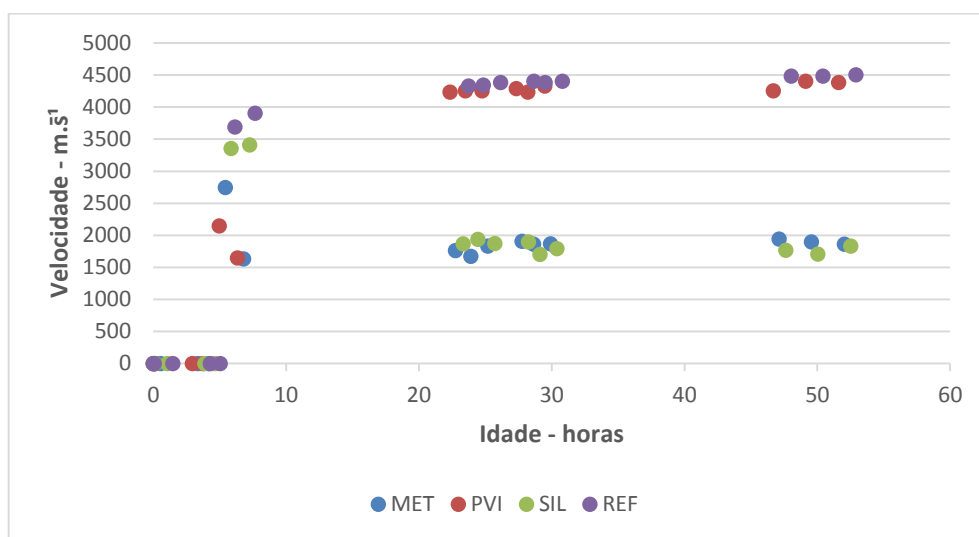


Figura 4.27 – Evolução da Velocidade de Ultrassons

Em comparação com a Figura 4.21, de Caetano, H.F.d.S. (2013), que apresenta uma evolução rápida da velocidade de ultrassons logo nas primeiras horas, devido ao endurecimento das pastas, a presença das adições, que são materiais sólidos, levariam a um aumento dos valores dos resultados, devido à maior velocidade de transmissão em material sólido.

Tabela 4.16 – Resumo dos resultados

AMO STR A	MOL DE	Idade de Temp. Máxima (h)	Temperatura Máxima ($^{\circ}C$)	Temperatura Mínima ($^{\circ}C$)	Variação da Temperatura ($^{\circ}C$)	Resistividade Máxima ($k\Omega cm$)
MET	HCA	00 06:10	30.91	22.17	8.74	48.13
PVI	HC B	00 08:35	30.94	22.13	8.81	29.46
SIL	HCC	00 05:49	35.13	22.04	13.09	37.15
REF	HCS	00 06:56	30.96	23.18	7.78	29.23

5

MODELAÇÃO NUMÉRICA

5.1. ASPETOS GERAIS

“Em estudo do comportamento de sistemas físicos são utilizados modelos físicos (usualmente em escala reduzida, de laboratório) e/ou modelos matemáticos. O avanço da ciência e o cotejamento entre esses modelos têm motivado um grande desenvolvimento dos modelos matemáticos, propiciando modelagens realísticas, confiáveis e de aplicações práticas na engenharia, muito mais económicas do que os modelos físicos.” (Soriano, H.L. and LIMA, S.D.S., 2003)

A utilização da modelação numérica, baseada no método de elementos finitos, tem como objetivo a resolução de problemas complexos através da sua simplificação, substituindo um problema complicado por um grupo de problemas equivalente determináveis mais simples. A simplificação do problema leva a que se façam aproximações da solução exata, que apesar da existência de modelos matemáticos avançados, nem sempre é possível obter a solução exata para todos os problemas.

A aplicação da modelação numérica permite que se façam vários processos de cálculo graças ao método de elementos finitos, através da divisão de um meio contínuo em várias partes (elementos finitos) em que se considera que as suas fronteiras estão em contacto e que os deslocamentos são aproximados por uma função. (Rao, S.S., 2005)

O DIANA (DISplacement Method ANALyser) é um programa de elementos finitos desenvolvido na Holanda, pela TNO Building and Construction Research, que graças à sua complexidade e polivalência permite análises de várias especialidades da engenharia civil e geotecnia como:

- Barragens e Diques
- Túneis & Estruturas Subterrâneas
- Estruturas de Betão Armado
- Análise Geotécnica
- Petróleo & Gás
- Engenharia Sísmica
- Análise Estrutural de Incêndio
- Endurecimento do Betão
- Alvenaria e Construções Históricas

A sua aplicação na presente dissertação consiste na utilização das suas capacidades de simulação do processo de hidratação do cimento e da interação com o meio envolvente, para proporcionar resultados

aproximados dos medidos no molde instrumentado. Pretende-se com esta modelação, a obtenção de curvas de temperatura iguais às obtidas no molde, e diagramas de temperatura para uma melhor interpretação da variação da temperatura ao longo de toda a geometria do provete.

5.2. CONSTRUÇÃO DO MODELO

No presente capítulo será feita uma descrição do processo de construção da geometria do modelo numérico, da definição e dimensão da malha, da definição da reação de hidratação do cimento através das proporções dos componentes da mistura, da definição do grau de hidratação inicial e período de análise. As linhas de comandos dos vários ficheiros necessários à modelação do modelo usado estão apresentados nos anexos.

A modelação começa com uma definição do tipo de análise a ser realizada, como o número de dimensões do modelo e a especialidade de aplicação, assim como a grandeza de unidades das variáveis.

Por razões de simplificação, o modelo foi definido como um corpo apenas e um conjunto de superfícies exteriores que se comporta como uma fronteira. A geometria do corpo é realizada pela criação de vários pontos, que depois são unidos em superfícies (faces) e por último gera-se o corpo final como um conjunto de superfícies (cubo de 10 centímetros de aresta).

A definição da malha de elementos finitos é feita em duas partes, a fronteira e o corpo. Como o modelo utilizado é de pequenas dimensões, e a licença de estudante disponibilizada ter comportamento limitado, apenas foi possível gerar malhas de divisão de 2,5 centímetros, que resultou numa malha de 16 elementos por face.

Tal como no molde instrumentado a leitura de todos os dados é feita no centro da base, mais precisamente no nó 58 da malha obtida, correspondente à localização do sensor de temperatura na base do molde instrumentado.

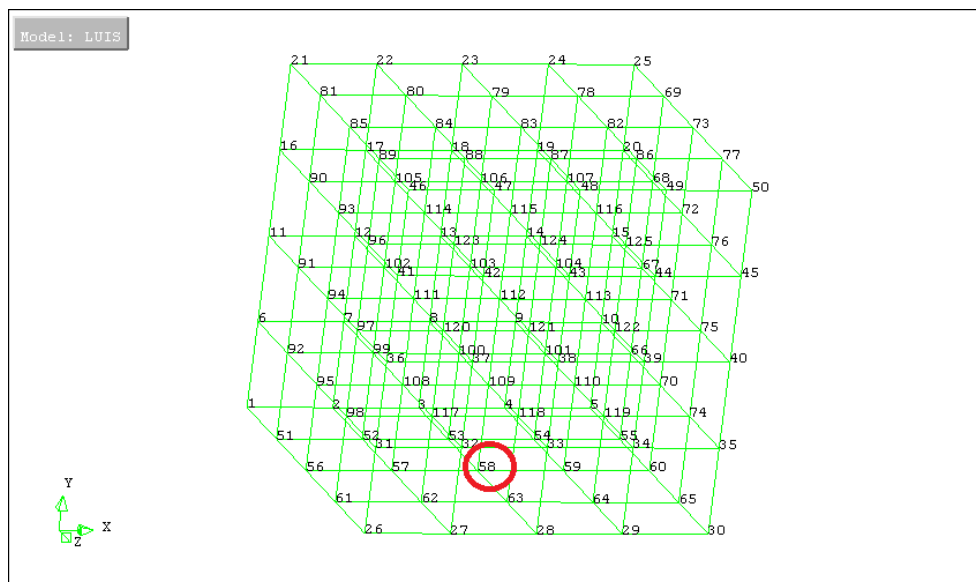


Figura 5.1 – Malha de Elementos Finitos



Figura 5.2 – Localização do Sensor de Temperatura

Após definição da geometria e geração da malha, procede-se à definição dos materiais e das suas propriedades. Como se trata de uma análise do comportamento térmico das pastas e argamassas, as propriedades materiais do corpo contarão com a inserção de dados em função das seguintes variáveis características dos materiais: a convecção térmica da fronteira (CONVEC), condutibilidade térmica (CONDUCT), calor específico (CAPACI), função da taxa de geração de calor (REACTI e PRDKAR), máximo calor gerado (MAXPRD), calor total gerado (ALPHA) e por fim, a constante de Arrhenius (ARRHEN).

A modelação numérica foi feita com base nas proporções dos constituintes definidas previamente (capítulo 4.2 e 4.3), e os valores tabelados na tese de doutoramento e na tese de mestrado do Prof. Miguel Azenha. (Azenha, M., 2009, Azenha, M.Â.D., 2004)

As tabelas consultadas para o desenvolvimento deste capítulo estavam divididas em tipo de cimento, em que o cimento usado nos ensaios foi o CEM I 42,5R, e também em duas diferentes empresas de produção, que apresentam diferenças significativas nos valores mais característicos, tendo-se realizado um estudo das duas empresas para uma melhor interpretação dos resultados.

Os cálculos seguintes repetem as fórmulas vistas no Capítulo 2.1, mas visto que nem no manual do programa nem em nenhuma bibliografia encontrada, a descrição do cálculo das diferentes variáveis foi encontrado, decidiu-se proceder à descrição pormenorizada do cálculo das diferentes variáveis, com o intuito de facilitar a aplicação do problema numérico por parte de outros potenciais utilizadores.

O cálculo da convecção térmica (CONVEC) é realizado em função das características do ar do meio ambiente e das características dos materiais constituintes da fronteira, tendo em conta os vários elementos constituintes, através da seguinte fórmula:

$$CONVEC = h_{eq} = \left(\frac{1}{h_1 \cdot A} + \sum_i^n \frac{L_i}{k_i \cdot A} \right)^{-1} \quad (5.1)$$

Em que:

h_{eq} – Convecção térmica equivalente ($W/m^2 \cdot K$)

h_1 - Coeficiente de convecção médio para uma superfície livre ($W/m^2 \cdot K$)

k_i – Condutibilidade térmica do elemento i (W/mK)

L_i – Comprimento do elemento i (m)

A – Área (m^2)

O estudo da condutibilidade térmica (CONDUC) e calor específico (CAPACI) no programa DIANA, ambos calculados em unidades SI, foi realizado com base na Tabela 5.1 e a Tabela 5.2, tendo-se considerado uma média de valores dos 20° aos 40° centígrados, devido aos valores de temperatura registados nos ensaios de razão de água cimento de pastas. Não foi considerada a presença do superplastificante nem do estabilizador, devido à falta de informação do comportamento destes nos efeitos, tanto na definição das variáveis como, no processo de produção de calor de hidratação.

Tabela 5.1 – Valores de Condutibilidade Térmica (W/mK) (Azenha, M.Â.D., 2004)

	21.1 °C	32.2 °C	43.3 °C	54.4 °C
Água	0.6	0.6	0.6	0.6
Cimento	1.23	1.27	1.31	1.35
Quartzo	3.09	3.08	3.07	3.06
Basalto	1.91	1.9	1.9	1.9
Dolomite	4.31	4.23	4.17	3.98
Granito	3.03	2.9	2.9	2.88
Calcário	4.03	3.94	3.86	3.79
Quartzito	4.69	4.65	4.61	4.57
Riólito	1.88	1.89	1.9	1.91

$$CONDUC = k_c = \frac{W_{cem} \cdot K_{cem} + (W_{sand} + W_{grav}) \cdot k_{agg} + W_w \cdot K_w}{\rho_c} \quad (5.2)$$

Em que:

k_c – Condutibilidade térmica ($W/m.K$)

W_{cem} – Massa de cimento na mistura por unidade de volume (Kg/m^3)

W_{agg} – Massa de inertes na mistura por unidade de volume (Kg/m^3)

W_w – Massa de água na mistura por unidade de volume (Kg/m^3)

k_{cem} – Condutibilidade térmica do cimento (W/mK)

k_{agg} – Condutibilidade térmica dos agregados (W/mK)

k_w – Condutibilidade térmica da água (W/mK)

ρ_c – Massa Volúmica da mistura

Tabela 5.2 – Valores de Calor Específico (J/kg.K) (Azenha, M.Â.D., 2004)

	21.1 °C	32.2 °C	43.3 °C	54.4 °C
Água	4187	4187	4187	4187
Cimento	456	536	662	825
Quartzo	699	745	795	867
Basalto	766	758	783	837
Dolomite	804	821	854	888
Granito	716	708	733	775
Calcário	749	758	783	821
Quartzito	691	724	758	791
Riólito	766	775	800	808

$$CAPACI = c_c = \frac{W_{cem} \cdot c_{cem} + (W_{sand} + W_{grav})c_{agg} + W_w \cdot c_c - c_{bindw} \cdot W_{cem} \cdot \alpha \cdot c_w}{\rho_c} \quad (5.3)$$

Em que:

$c_{bindw} = 0,2$

c_c – Calor específico do betão (J/kg.K)

c_w – Calor específico da água (J/kg.K)

c_{cem} – Calor específico do cimento (J/kg.K)

c_{agg} – Calor específico dos inertes (J/kg.K)

α – Grau de hidratação do cimento

Para a definição das propriedades de produção de calor proveniente da reação de hidratação do cimento, era necessário a introdução de curvas de temperatura adiabáticas ou então, a introdução de curvas da taxa de geração de calor. Visto que não foi desenvolvido um estudo da definição das curvas de temperatura adiabáticas, porque este obrigava a que fosse realizado um estudo do calor de hidratação libertado nos diversos tipos de pastas num calorímetro, foi então necessário proceder à definição das curvas de geração de calor, em função da taxa de geração de calor, tendo sido usados os valores estudados por Azenha, M. (2009):

Tabela 5.3 – Taxa de Geração de Calor normalizada em função do tipo de cimento e grau de hidratação (α_T)

CA – CEM I 42.5R		CB – CEM I 42.5R	
α_T	$f(\alpha_T)$	α_T	$f(\alpha_T)$
0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	0.65	0.05	0.58
0.10	0.91	0.10	0.85
0.15	1.00	0.15	0.98
0.20	0.98	0.20	1.00
0.25	0.94	0.25	1.00
0.30	0.86	0.30	0.94
0.35	0.75	0.35	0.83
0.40	0.63	0.40	0.69
0.45	0.51	0.45	0.55
0.50	0.41	0.50	0.41
0.55	0.32	0.55	0.30
0.60	0.24	0.60	0.22
0.65	0.18	0.65	0.17
0.70	0.13	0.70	0.13
0.75	0.09	0.75	0.1
0.80	0.06	0.80	0.07
0.85	0.04	0.85	0.04
0.90	0.02	0.90	0.02
0.95	0.01	0.95	0.01
1.00	0.00	1.00	0.00

Para a definição da geração de calor de hidratação, é necessária a definição tanto do total de calor gerado (MAXPRD) e da taxa máxima de geração de calor (ALPHA), também definidos em unidas SI e através dos valores tabelados:

Tabela 5.4 – Calor Total Gerado para Cimento A (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)

CA – CEM I 42.5R	20 °C	30 °C	40 °C	50°C	60°C
Q_{∞}	355.2	364.5	369	379.9	383.7

Tabela 5.5 – Calor Total Gerado para Cimento B (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)

CB – CEM I 42.5R	20 °C	30 °C	40 °C	50°C	60°C
Q_{∞}	370.3	350.4	350.9	361.7	-

$$MAXPRD = Q_{\infty} \times W_{cem} \quad (5.4)$$

Em que:

Q_{∞} - Calor total gerado (kJ/kg)

Tabela 5.6 – Taxa máxima de geração de calor para Cimento A (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)

CA – CEM I 42.5R	20 °C	30 °C	40 °C	50°C	60°C
$Q_{m\acute{a}x}$	3.21	6.16	10.2	18.41	27.6
$\Delta t(Q_{m\acute{a}x})$	0.17	0.16	0.17	0.25	0.26
$t(Q_{m\acute{a}x})$	8.9	5.1	3.6	3	2.4

Tabela 5.7 – Taxa máxima de geração de calor para Cimento B (kJ/kg) (Azenha, M., 2009)

CEM I CB	20 °C	30 °C	40 °C	50°C	60°C
$Q_{m\acute{a}x}$	4.29	7.86	14	23.17	-
$\Delta t(Q_{m\acute{a}x})$	0.18	0.25	0.23	0.21	-
$t(Q_{m\acute{a}x})$	8.1	5.7	3.6	2.5	-

$$ALPHA = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}}} \cdot W_{cem} \quad (5.5)$$

Em que:

$Q_{m\acute{a}x}$ – Taxa máxima de geração de calor (kJ/kg)

E_a - Energia de ativação aparente do betão (J/mol)

R - Constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)

T – Temperatura (K)

$$ARRHEN = \frac{E_a}{R} \quad (5.6)$$

Com a definição de todos os parâmetros necessários à modelação correta da hidratação das pastas e argamassas no modelo desejado, procede-se à análise de dados para se fazer a leitura de resultados. Esta análise de dados foi realizada para um grau de hidratação de 1%, significando que no momento de entrada das misturas no molde instrumentado apenas se deu 1% da reação hidratação do cimento, devido ao curto período de tempo entre a amassadura e o enchimento do molde. O valor padrão do programa DIANA é de 10%, visto estar desenvolvido para grandes obras de engenharia, em que o betão é transportado em camiões, e ocorre um processo de espera entre a amassadura e a betonagem.

A análise de dados foi feita em 48 leituras de hora a hora, 48 períodos de 3600 segundos no DIANA nas unidades definidas previamente. Esta análise permite uma boa interpretação dos dados obtidos nas primeiras idades do endurecimento das pastas e argamassas, gerando curvas de temperatura e diagramas com o rigor necessário para uma correta avaliação do problema em estudo.

As informações a obter são curvas de temperatura tais como as adquiridas nos ensaios laboratoriais, e graças às potencialidades do programa de modelação, também se procederá à geração de mapas de temperatura que permitem uma melhor interpretação da variação desta ao longo da peça em estudo.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. CALIBRAÇÃO DA CONVECÇÃO

A aquisição de dados por parte do programa de método de elementos finitos DIANA, depende da introdução de dados e variáveis, que caracterizam o modelo em estudo e as condições deste.

Este modelo numérico depende da definição das condições de geometria, condições ambientais como convecção e condutividade dos materiais, e por último, a descrição correta dos constituintes das pastas e argamassas, assim como, das respetivas características de hidratação do cimento, para que seja corretamente caracterizada a geração do calor de hidratação.

O estudo da convecção foi feito a partir da fórmula (2.18), tendo-se em consideração a espessura da cofragem em contraplacado marítimo de 2,5 centímetros, em que o resultado obtido foi de 3,75.

Como a sala de laboratório garante condições muito estáveis tanto de temperatura como de humidade, a caracterização das condições ambientais do estudo foi simples, não entrando neste estudo a circulação de ar nem uma variação da temperatura ao longo do tempo.

O resultado obtido para a convecção seria para condições ideais, em que o molde estaria elevado, sem nenhuma face em contacto com nenhuma superfície, e que todas as faces não teriam nenhum tipo de variação de geometria. Na verdade, estas condições ideais não se verificaram, visto que, tal como descrito anteriormente, o molde conta com vários orifícios nas suas faces, que permitem a realização do estudo da resistividade e ultrassons. A elevada dimensão dos dois orifícios de leitura da velocidade de ultrassons, assim como os orifícios na tampa dos moldes para a passagem das malhas metálicas, apesar de necessários, permitem uma grande fuga de calor, mudando as condições de transferência de calor ideais.

Além dos vários orifícios ao longo do molde, verifica-se também, que a presença das malhas metálicas (Figura 3.5) resulta numa transmissão do calor gerado no interior do molde para o exterior, tal como se verifica na Figura 5.3.

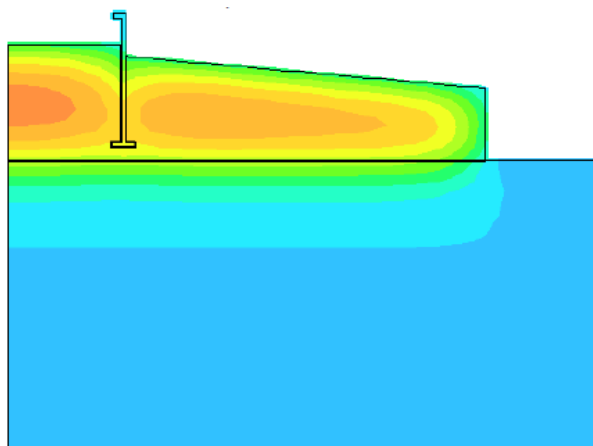


Figura 5.3 – Efeitos da presença de um corpo metálico em contacto com o betão e o exterior (Azenha, M., 2009)

Em adição às condições anteriormente descritas ainda se acrescenta o facto de os moldes serem colocados sobre uma mesa metálica, que como é sabido tem um coeficiente de condutibilidade térmica elevado, e portanto alterando as condições térmicas, principalmente devido ao facto da localização do termómetro ser na base, alterando a leitura correta dos dados.

Com o objetivo de proporcionar a maior fiabilidade de resultados possível, realizou-se um estudo da convecção realmente atuante nos moldes, utilizando os dados obtidos no ensaio de água, relacionando-se o decréscimo de temperatura ao longo do tempo, com as propriedades do molde.

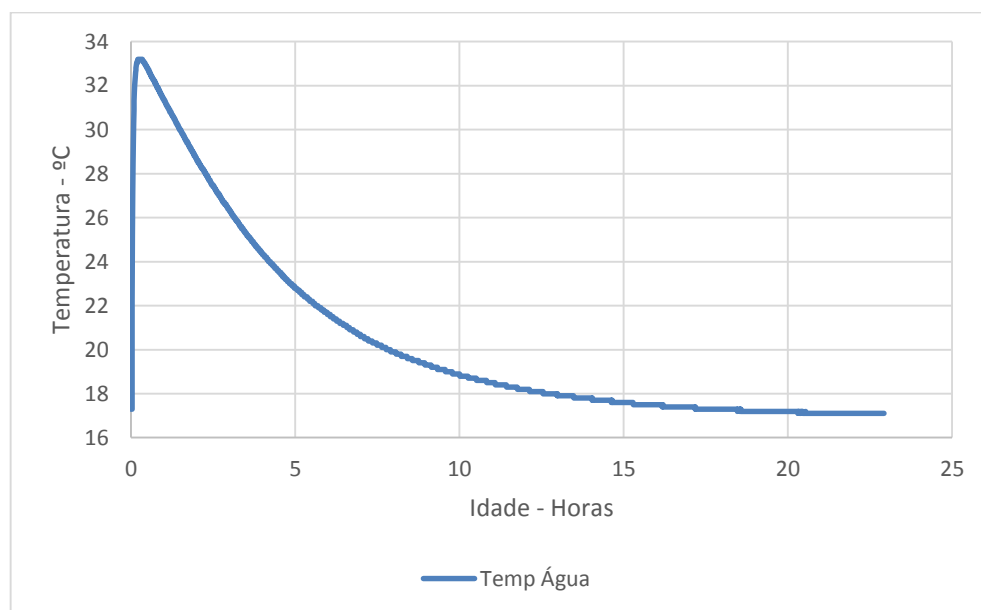


Figura 5.4 – Variação da Temperatura da Água

Com base na curva obtida no ensaio de calibração do molde (Figura 5.4) que caracteriza o decréscimo da temperatura de um molde nas condições em que o estudo das pastas foi realizado, com o molde fechado e sem qualquer adição de isolantes térmicos, procedeu-se a uma modelação com as características geométricas do molde, as características de temperatura da sala de laboratório e das características físicas dos componentes do molde e da água. Este estudo apenas contou com a introdução das seguintes variáveis:

Tabela 5.8 – Variáveis Introduzidas no programa DIANA

INITEMP	Temperatura Inicial da Água - °C
EXTTEMP	Temperatura Ambiente - °C
CONDOC	Condutibilidade térmica - W/m.K
CAPACI	Calor Específico - J/(K.m3)
CONVEC	Convecção Térmica - W/m².K

O objetivo inicial consistia em garantir na modelação numérica uma curva de temperatura igual à proporcionada pelo molde, mas esta não foi possível porque o programa não considera o efeito da evaporação de água, resultante do abandono das moléculas de maior energia do líquido no processo de evaporação. Desta maneira, a temperatura mínima registada não corresponde com a obtida no modelo numérico, que tende para a temperatura ambiente.

A modelação também não conta com o efeito de correntes de convecção no volume de água dentro do molde, devidas à diferença de temperatura das faces do molde com a água no seu interior. Apesar do reduzido volume de água, estas correntes podem condicionar a condutibilidade térmica calculada, embora tenham sido desprezadas neste estudo, visto que se considera que como as condições ambientais são muito estáveis, este facto deve ser muito reduzido senão mesmo nulo.

Esta calibração foi realizada através de várias iterações, em que a única variável foi a convecção visto que se assume que as outras variáveis são referentes à água e são constantes e conhecidas, com valores referentes à temperatura exterior medida no ensaio realizado, a variável da condutibilidade térmica e do calor específico obtidos com base nos valores tabelados em Azenha, M. (2009).

Tabela 5.9 – Variáveis constantes no estudo da calibração da convecção

EXTTEMP	18.1
CONDOC	0.6
CAPACI	4.187E+06

As várias iterações permitiram que se gerassem curvas como as obtidas no ensaio da caracterização do molde em estudo (capítulo 4.1), fazendo-se variar a convecção de maneira a obter um comportamento o mais similar possível, tendo em conta que o efeito da evaporação não é considerado neste estudo, alterando os valores e a inclinação da curva final.

Tendo em conta que o molde conta com várias aberturas que possibilitam a fuga de calor para o exterior, o contacto com uma mesa metálica de grande condutibilidade, assim como a presença do termómetro na base, não caracterizam condições ideais que teoricamente proporcionariam uma convecção térmica de 3.75, leva à conclusão que o valor de convecção final obtido de 6.2, seja um valor bastante plausível face as condições presentes, tal como se pode verificar na Figura 5.5, em que as curvas têm um comportamento muito parecido, com declives muito próximos nas horas mais críticas, de maior libertação de calor.

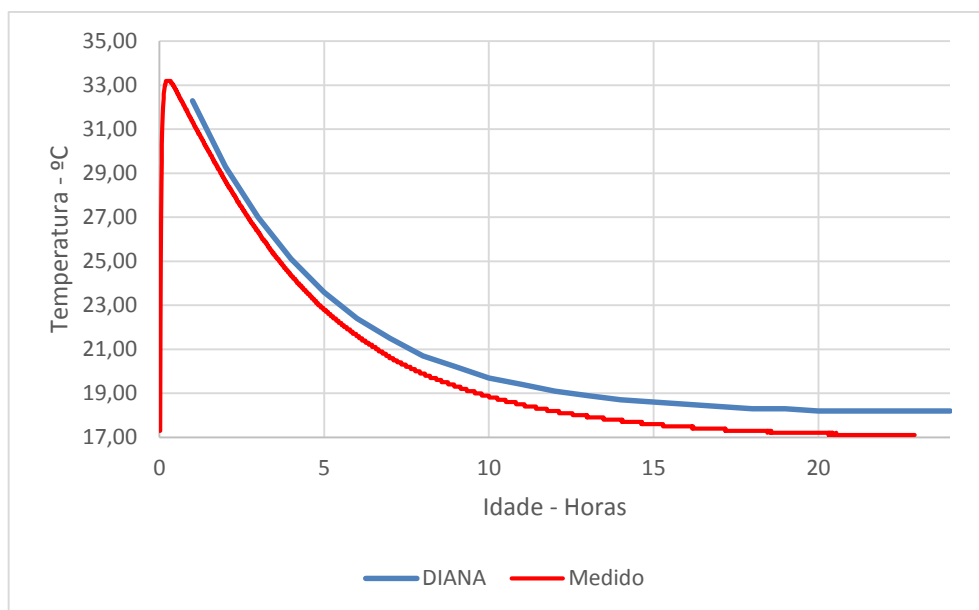


Figura 5.5 – Comparação entre Temperatura registrada no molde e no DIANA

Para proporcionar maior credibilidade aos resultados obtidos, o estudo foi realizado através de uma relação linear entre certos pontos notáveis escolhidos, que consistem, na temperatura à primeira hora devido à escolha de se realizar uma leitura de dados no programa de hora a hora, não havendo registo anterior a este ponto, e comparando também a idade que se registam três diferentes temperaturas (26, 24 e 22° centígrados), que foram escolhidas por fazerem parte de um período importante de decréscimo da temperatura da água como é possível interpretar na Figura 5.6.

Tabela 5.10 – Comparação entre Valores Medidos e Aproximados

Medido		Aproximado	
Temperatura (°C)	Idade (h)	Temperatura (°C)	Idade (h)
30.8	1	32.3	1
26	3	26	3.61
24	4	24	4.58
22	5.5	22	6.39
Declive = -1.9789		Declive = -1.9522	

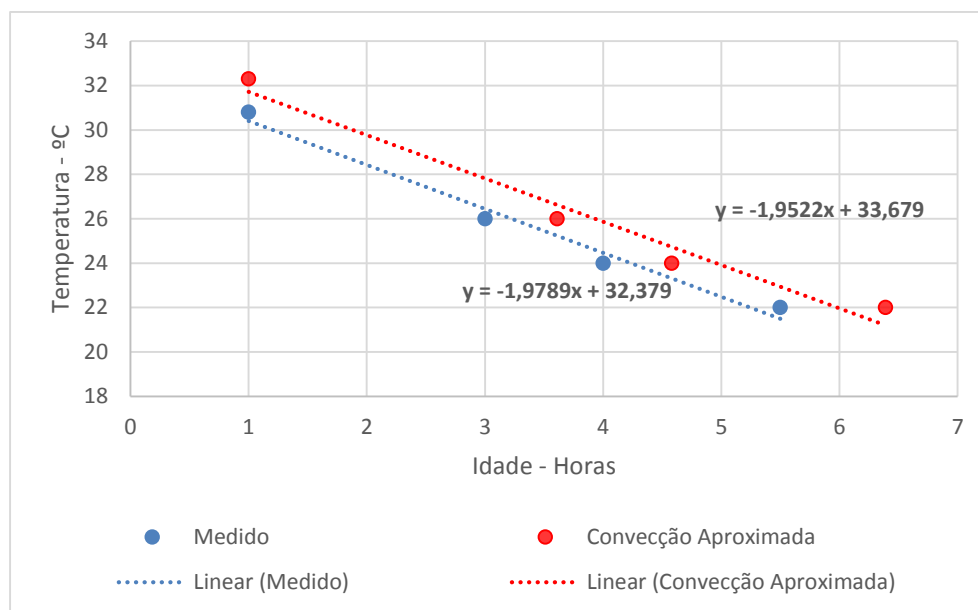


Figura 5.6 – Comparação decaimento de temperatura

O estudo do declive das linhas de tendência geradas a partir dos pontos notáveis, permitiu em conjunto com a curva de temperatura obtida no programa de modelação, proporcionar alguma fiabilidade ao valor obtido para a convecção térmica (6,2). Este valor foi definido como o valor padrão para todas as modelações, de maneira a garantir que os ensaios realizados não contem com a convecção como variável, e assim garantir que as restantes variáveis apenas dependam das composições das pastas e das propriedades cimentícias destas.

5.3.2. MODELAÇÃO DE DIFERENTES RAZÕES DE ÁGUA CIMENTO DE PASTAS

De maneira a proporcionar uma relação entre as diferentes proporções dos constituintes nas pastas e argamassas cimentícias com o calor gerado devido às reações de hidratação do cimento, procedeu-se à modelação numérica para desta maneira se compreender a aplicabilidade de uma modelação numérica num relacionamento dos resultados obtidos com os verificados nos ensaios.

Primeiramente, procedeu-se a uma modelação de diferentes convecções com o objetivo de justificar a escolha da convecção calibrada, através de uma modelação do estudo dos cimentos de ambas as empresas para os dois valores de convecção calculados. Segundo as tabelas e fórmulas previamente mostradas obtiveram-se os seguintes parâmetros de caracterização das pastas, com base nas proporções obtidas na (Tabela 5.11):

Tabela 5.11 – Cimento A e Cimento B para convecção teórica de 3,75 e A/C=0,3

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONDUC	1.77E+00	1.77E+00
CAPACI	2.85E+06	2.85E+06
MAXPRD	3.96E+08	3.9E+08
ALPHA	2.33E+11	3.86E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02

CONVEC	3.75	3.75
T_{máx} (DIANA)	53.4	66
T_{máx} (Molde)	43.18	43.18

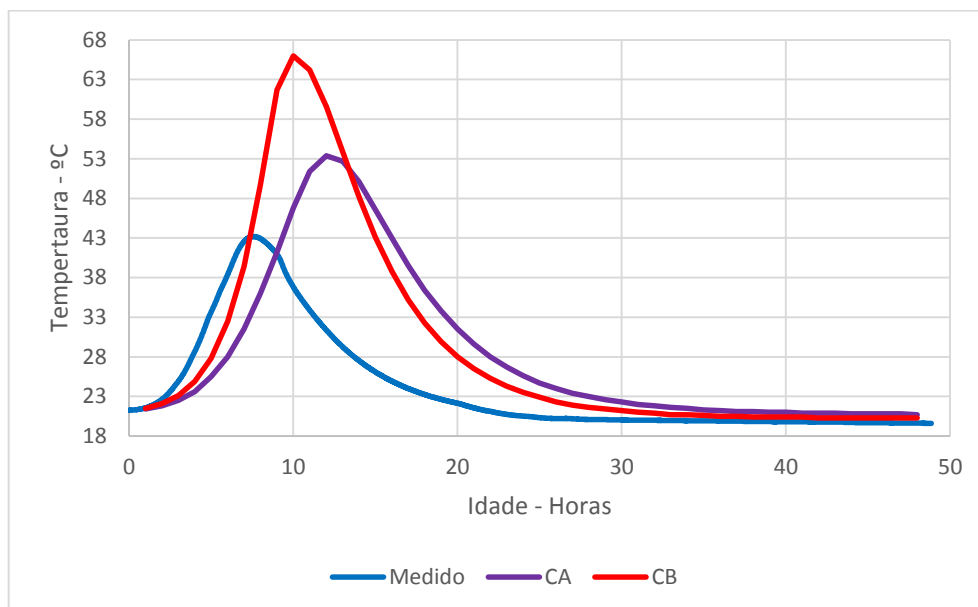


Figura 5.7 – Modelação de A/C=0,3 para convecção teórica de 3,75

Após interpretação tanto da tabela como do gráfico gerado pela modelação, é compreensível que a convecção teórica não caracteriza corretamente as condições presentes, ao apresentar picos de temperatura máxima muito superiores aos realmente medidos no ensaio. No entanto, é possível visualizar um correto trabalho do programa de modelação, ao proceder ao registo de curvas de temperatura que seguem os formatos esperados, assim como diagramas de temperatura (Figura 5.7) com um claro pico da temperatura no centro do molde face aos vértices, tal como era previsto.

Para uma melhor interpretação dos resultados, procedeu-se em todas as modelações a um registo da temperatura máxima registada no programa de modelação, à temperatura máxima medida no molde de ensaio e por fim, a uma razão entre estes. Desta maneira é possível compreender a variação de temperatura entre eles, e grandeza da variação de valores lidos.

Tabela 5.12 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,3 e Convecção de 3,75

T_{méd} (DIANA)	59.7
T_{máx} (Molde)	43.18
Variação	38%

O estudo para a convecção calibrada, conta com todos os mesmos parâmetros que caracterizam as propriedades e proporções dos componentes da pasta, procedendo-se só à alteração do valor do parâmetro CONVEC:

Tabela 5.13 – Cimento A e Cimento B para convecção calibrada de 6,2 e A/C=0,3

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONDUC	1.77E+00	1.77E+00
CAPACI	2.85E+06	2.85E+06
MAXPRD	3.96E+08	3.9E+08
ALPHA	2.33E+11	3.86E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2
T _{máx} (DIANA)	36.9	45.4
T _{máx} (Molde)	43.18	43.18

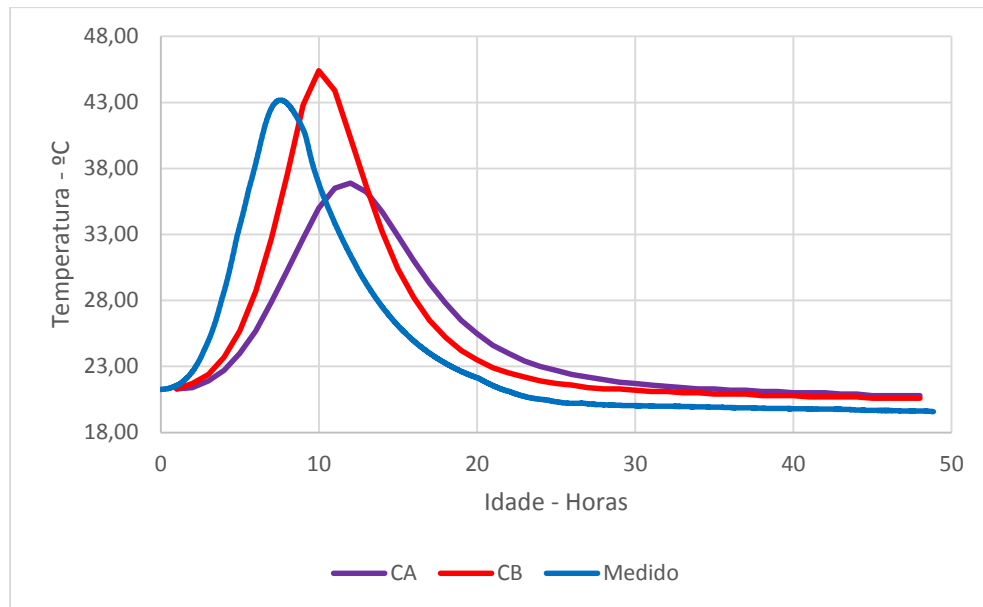


Figura 5.8 – Modelação de A/C=0,3 para convecção calibrada de 6,2

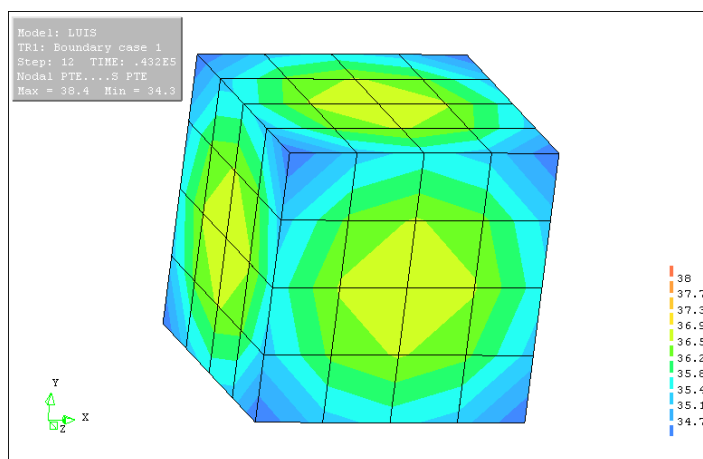


Figura 5.9 – Mapa de variação de temperatura para convecção calibrada de 6,2, A/C=0,3 e Cimento A

A convecção calibrada proporcionou resultados mais no encontro do ensaio das pastas, ao proporcionar curvas de temperatura bastante similares aos medidos. Os resultados obtidos permitem uma interpretação da variação que se pode esperar entre as diferentes empresas de cimento, em que o cimento B regista valores superiores em toda a modelação, graças a uma diferente taxa de geração de calor e calor total gerado.

Um facto importante das curvas de temperatura modeladas reside em que estas estão ligeiramente deslocadas para a direita, caracterizando uma reação de hidratação mais lenta do que realmente se verifica. Este facto poderia ser corrigido com uma correta análise da geração de calor através do uso de calorímetro, mas como esse ensaio não foi possível de ser realizado no tempo que havia disponível, resultando assim, que o formato das curvas está dependente das funções de taxa de geração de calor definidas pelo Prof. Miguel Azenha. O estudo foi então resumido a um estudo da forma e da temperatura máxima registada nas curvas de temperatura modeladas, para deste modo, compreender a capacidade de leitura dos dados através da modelação numérica.

Tabela 5.14 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,3 e Convecção de 6,2

T_{méd} (DIANA)	41.15
T_{máx} (Molde)	43.18
Variação	-5%

Esta modelação para uma razão de água cimento de 0,3 e uma convecção calibrada de 6,2 proporcionou uma variação entre a temperatura média dos cimentos das duas empresas de venda em Portugal e a temperatura máxima registada no molde de 5%, que se considera uma variação muito aceitável face ao elevado nível de incertezas, tanto a nível da convecção como na definição dos parâmetros das características dos materiais.

Com base nas proporções na Tabela 4.1, procedeu-se à modelação da pasta com razão de água cimento de 0,4, em que os resultados obtidos para os seus parâmetros são os seguintes:

Tabela 5.15 – Cimento A e Cimento B para A/C=0,4

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONDUC	2.18E+00	2.18E+00
CAPACI	2.89E+06	2.89E+06
MAXPRD	2.73E+08	2.684E+08
ALPHA	1.61E+11	2.65E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	28.9	32.6
T_{máx} (Molde)	36.32	36.32

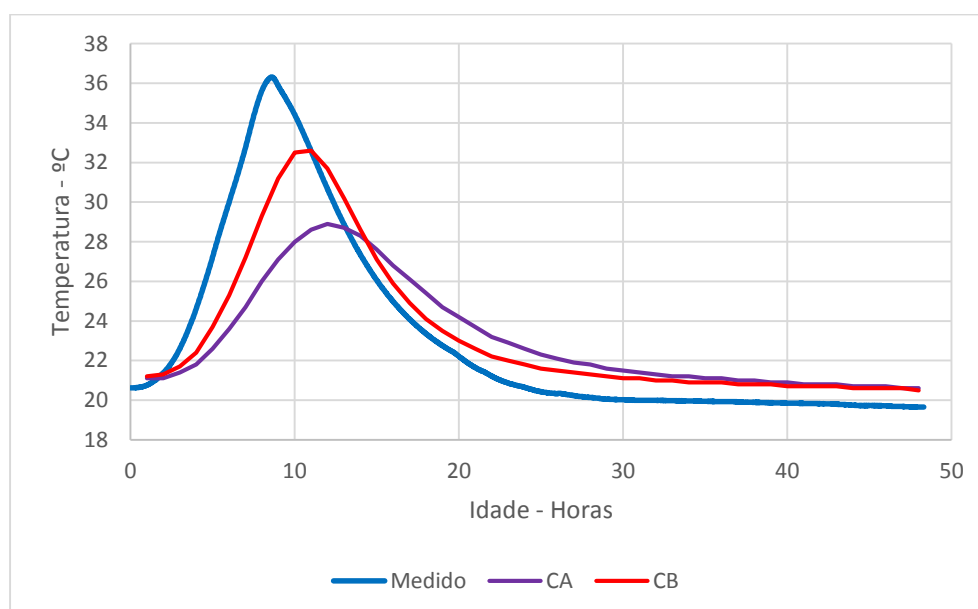


Figura 5.10 – Modelação para A/C=0,4

Tabela 5.16 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,4

T_{méd} (DIANA)	30.75
T_{máx} (Molde)	36.32
Variação	-15%

Para os parâmetros calculados para a razão de água cimento de 0,4, os resultados obtidos foram inferiores aos esperados, na medida em que ambas as curvas se encontram inferiores à curva de temperatura real. Com o objetivo de se obter uma leitura mais característica das condições realmente vistas, e da distribuição da temperatura ao longo do molde, procedeu-se a uma calibração dos parâmetros, para que desta maneira se fosse ao encontro dos valores reais.

Como tanto as condições de convecção e da função da taxa de geração de calor são valores que necessitam de estudos rigorosos, procedeu-se apenas a uma variação do calor gerado, aumentando

portanto tanto o calor máximo gerado ($Q_{\text{máx}}$) e também o calor total (Q_{∞}), desta maneira aumentando as curvas de temperatura ao aumentar o calor gerado pela reação de hidratação, sem alterar as condições de condutividade térmica, calor específico dependentes da proporção de componentes da pasta.

O processo foi feito de uma maneira iterativa, aumentando progressivamente os parâmetros MAXPRD e ALPHA em graus de 5%, para que desta maneira se obtivesse uma subida progressiva dos valores até que fossem obtidos valores próximos dos medidos.

Tabela 5.17 – Iterações da Quantidade de cimento para A/C=0,4

Iterações	Cimento A	Cimento B	Cimento A (+35%)	Cimento B (+35%)
CONDUC	2.178	2.18	2.178	2.18
CAPACI	2.89E+06	2.89E+06	2.89E+06	2.89E+06
MAXPRD	2.73E+08	2.68 E+08	3.77E+08	3.71 E+08
ALPHA	1.61E+11	2.65E+11	2.22E+11	3.66E+12
ARRHEN	5271.83	5337.98	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2	6.2	6.2
T _{máx} (DIANA)	28.9	32.6	35.1	42.3
T _{máx} (Molde)	36.32		36.32	
Variação	-15%		7%	

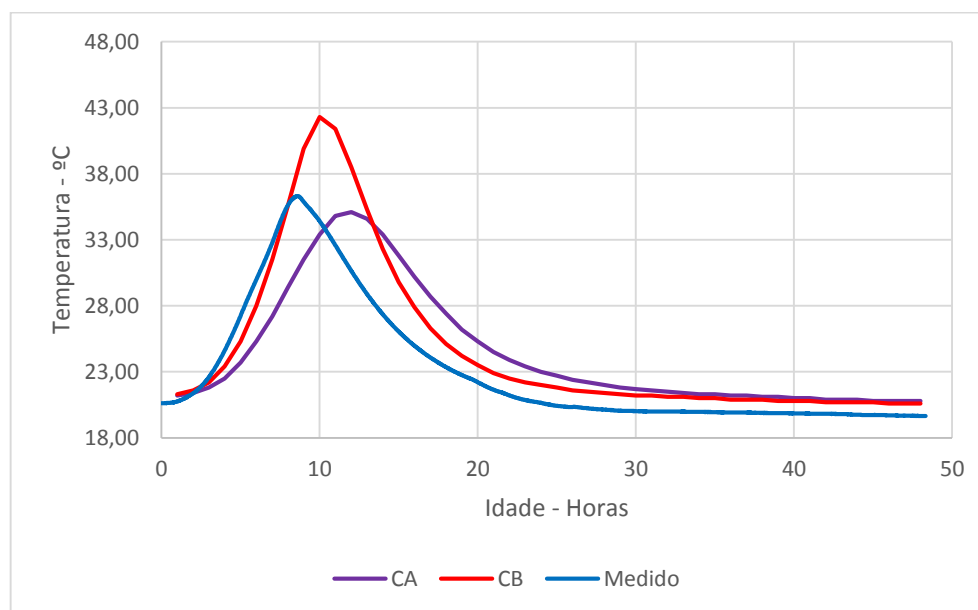


Figura 5.11 – Modelação corrigida para A/C=0,4

Para uma obtenção correta de curvas de temperatura próximas da curva real medida no molde, foi necessário fazer um incremento dos valores, tanto de calor máximo produzido como de calor total em 35%. Para este aumento da produção de calor gerou-se um aumento de 7% da temperatura máxima face ao valor real, que se considera uma variação aceitável, visto que proporciona curvas de temperatura que descrevem corretamente o comportamento da pasta cimentícia de razão de água cimento de 0,4.

Com o aumento da razão de água cimento, e consequentemente uma redução da quantidade de cimento nas misturas, verifica-se um aumento da contabilidade térmica da pasta devido à substituição de cimento por fíler calcário, com condutibilidade superior à do cimento. Também se verifica este aumento no calor específico, mas em valores menos notórios

As principais diferenças encontram-se no máximo calor gerado ($Q_{\text{máx}}$) e total calor libertado (Q_{∞}), que estando diretamente relacionados com a quantidade de cimento sofrem de reduções significativas.

Os resultados obtidos para a razão de água cimento igual a 0,5 foram os seguintes:

Tabela 5.18 – Cimento A e Cimento B para A/C=0,5

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONDUC	2.34E+00	2.34E+00
CAPACI	2.90E+06	2.90E+06
MAXPRD	2.23E+08	2.2E+08
ALPHA	1.31E+11	2.17E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	26.6	29.3
T_{máx} (Molde)	33.46	33.46

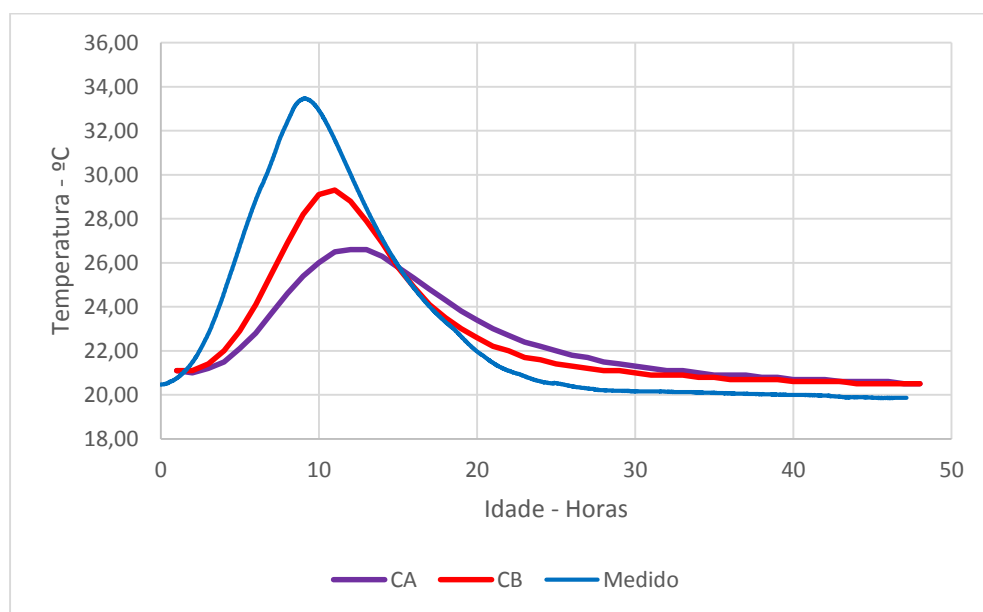


Figura 5.12 – Modelação para A/C=0,5

Tabela 5.19 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,5

T_{méd} (DIANA)	27.95
T_{máx} (Molde)	33.46
Variação	-16%

Tal como na mistura de razão de água cimento igual a 0,4 os valores obtidos não corresponderam com os valores medidos no molde, tendo-se procedido a uma calibração dos resultados de maneira a compreender a ordem de grandeza da variação dos resultados.

Tabela 5.20 – Iterações da Quantidade de cimento para A/C=0,5

Iterações	Cimento A	Cimento B	Cimento A (+35%)	Cimento B (+35%)
CONDOC	2.34E+00	2.34E+00	2.34E+00	2.34E+00
CAPACI	2.90E+06	2.90E+06	2.90E+06	2.90E+06
MAXPRD	2.23E+08	2.20E+08	3.01E+08	2.97E+08
ALPHA	1.31E+11	2.17E+11	1.77E+11	2.93E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	26.6	29.3	30.3	34.7
T_{máx} (Molde)	33.46		33.46	
Variação	-16%		-3%	

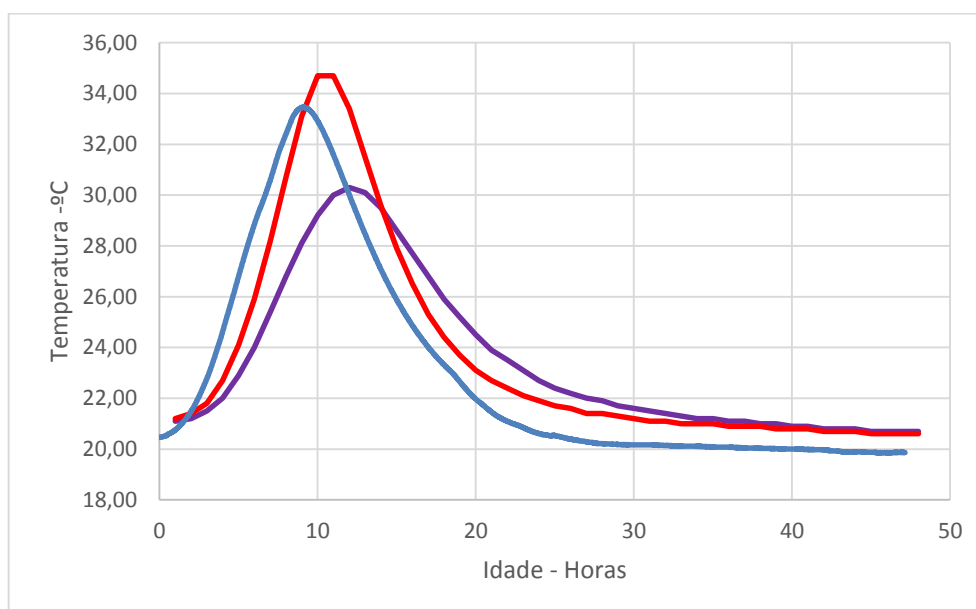


Figura 5.13 – Modelação corrigida para A/C=0,5

O processo iterativo de calibração de resultados no programa de modelação levou a um aumento da percentagem de cimento em 35%, proporcionando então uma aproximação das curvas dos tipos de

cimento à curva de temperatura real, assim como um diagrama de variação de temperatura no modelo igual ao esperado.

É notório o decréscimo de temperatura, provocado por uma menor geração de calor graças à redução de volume de cimento na mistura, verificando-se que as curvas tendem a ficar mais “achatadas” devido à redução do total calor gerado pela reação.

A variação de temperaturas final, que conta com a média entre as temperaturas máximas registadas para o cimento A e B, resultou num valor muito próximo da correto com uma diferença de apenas 3% face ao valor real.

Por último, procedeu-se à modelação da mistura com menor volume de cimento, esperando-se uma redução da temperatura máxima registada, assim como uma curva de temperatura mais achatada tal como a verificada no ensaio das pastas no capítulo 4.2.

Tabela 5.21 – Cimento A e Cimento B para A/C=0,6

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONduc	2.42E+00	2.42E+00
CAPACI	2.91E+06	2.91E+06
MAXPRD	2.00E+08	1.97E+08
ALPHA	1.18E+11	1.95E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	25.7	28
T_{máx} (Molde)	29.67	29.67

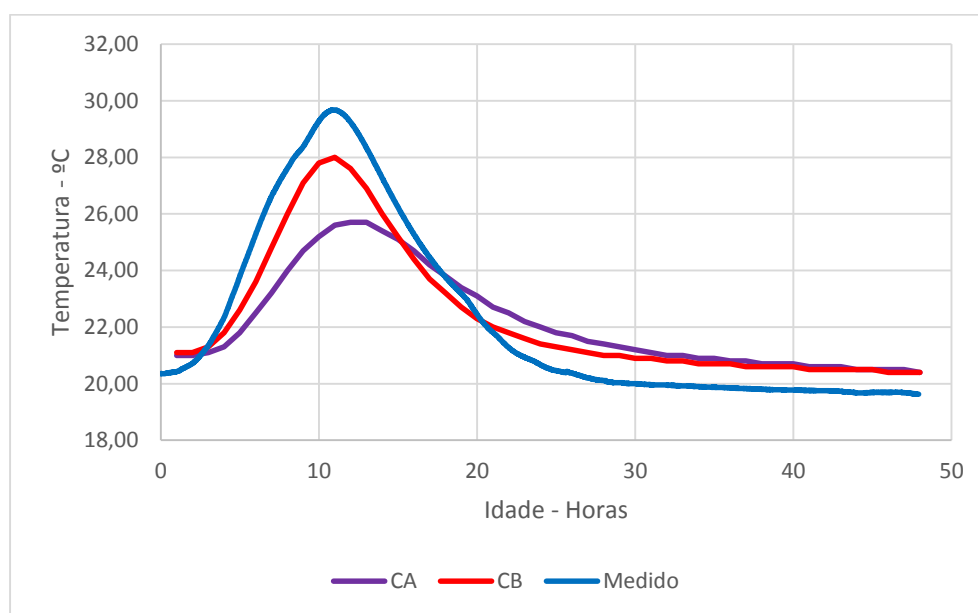


Figura 5.14 – Modelação para A/C=0,6

Tabela 5.22 – Variação de Valores de Temperatura Máxima para A/C=0,6

T_{méd} (DIANA)	26.85
T_{máx} (Molde)	29.67
Variação	-10%

Tabela 5.23 – Iterações da Quantidade de cimento para A/C=0,6

Iterações	Cimento A	Cimento B	Cimento A (+30%)	Cimento B (+30%)
CONDUC	2.42E+00	2.42E+00	2.42E+00	2.42E+00
CAPACI	2.91E+06	2.91E+06	2.91E+06	2.91E+06
MAXPRD	2.00E+08	1.97 E+08	2.60E+08	2.56 E+08
ALPHA	1.18E+11	1.95E+11	1.53E+11	2.53E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	25.7	28	28.2	31.7
T_{máx} (Molde)	29.67		29.67	
Variação	-10%		1%	

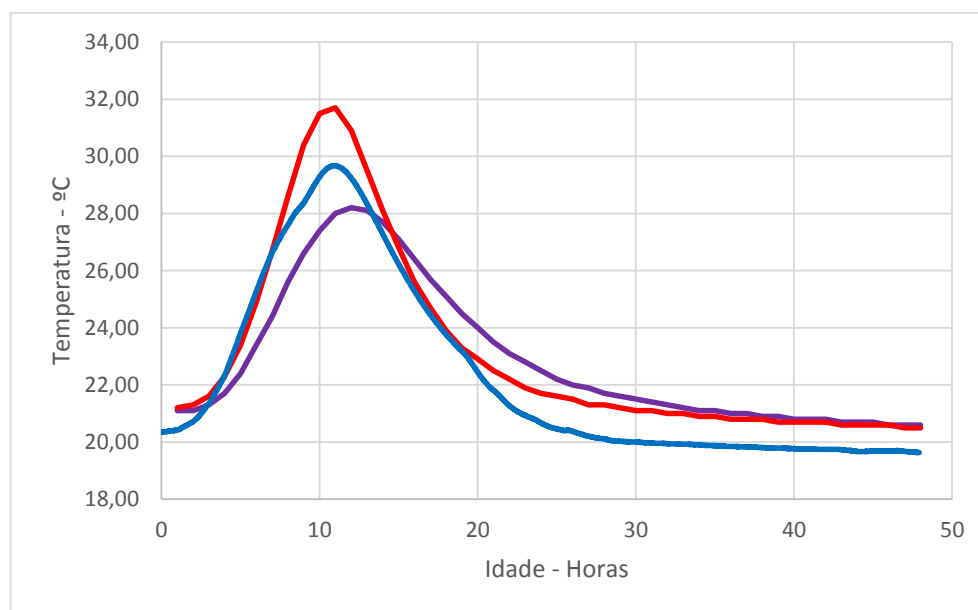


Figura 5.15 – Modelação corrigida para A/C=0,6

A modelação, mais uma vez, não ofereceu os valores esperados, tendo havido a necessidade de se calibrar os resultados, de maneira a obter um resultado aproximado dos valores de temperatura medidos. O resultado final foi no entanto positivo, tendo-se obtido as curvas mais parecidas com a realidade. As temperaturas máximas obtidas mostram uma variação de apenas 1% em comparação com a temperatura máxima registada no molde.

O aspeto mais importante da modelação desta razão de água cimento foi a obtenção de uma curva com características muito próximas da curva real. A característica que mais se destacou foi o facto de a idade correspondente à temperatura máxima ser muito parecida com a idade real segundo as medições realizadas.

Os resultados obtidos pela modelação numérica das várias misturas permitiu verificar que o estudo da calibração da convecção térmica foi bem realizado, tendo-se verificado valores próximos dos medidos nos ensaios de pastas do capítulo 4.2.

A modelação mostrou uma insuficiente produção de calor através da reação de hidratação do cimento, evidenciando uma má definição dos parâmetros, apesar de não haver certeza absoluta da natureza destas diferenças, podendo partir de várias variáveis. O facto de se partir de vários valores tabelados proporciona alguma incerteza ao problema.

Outra questão a ter em conta na modelação, é o desconhecimento do efeito do uso do superplastificante e do estabilizador nas misturas, tendo sido mesmo desprezados no cálculo das variáveis a introduzir no programa.

O superplastificante é um aditivo químico que quando adicionado a uma mistura de betão aumenta a sua trabalhabilidade, sendo de especial importância o seu uso em misturas com grande quantidade de cimento como as estudadas, devido à necessidade de produzir betões de elevado desempenho. Comporta-se como um desfloculante, ao separar as partículas de cimento que não conseguiriam então entrar em contacto com a água, e permitir a reação química destas. As pastas de elevado desempenho estudadas poderão não reagir a totalidade do cimento presente na mistura, sendo mesmo o esperado visto o elevado volume de cimento nas misturas.

O uso da mesma quantidade de superplastificante em todas as misturas pode levar a uma incorreta interpretação dos resultados, em que nas razões de água cimento maiores ocorrerá uma reação da quantidade cimento total superior às diferentes misturas com menor razão.

No entanto, o facto da mistura razão de água cimento igual a 0,3 conter uma quantidade de cimento bastante superior, o uso do superplastificante pode não ser suficiente, resultando numa produção de calor inferior ao possível, e desta maneira levando a que os dados modelado tenham batido certo com os medidos, ao contrário das modelações para razões de água cimento maiores.

Como conclusão final apresenta-se um resumo dos resultados obtidos pela modelação, em que se compara os resultados obtidos com os resultados calibrados, tanto do calor total gerado e da temperatura máxima. No caso da razão de água cimento de 0,3 apenas se apresentam os valores obtidos para a convecção calibrada de 6,2 visto que estes representaram corretamente o comportamento esperado, com valores próximos dos medidos.

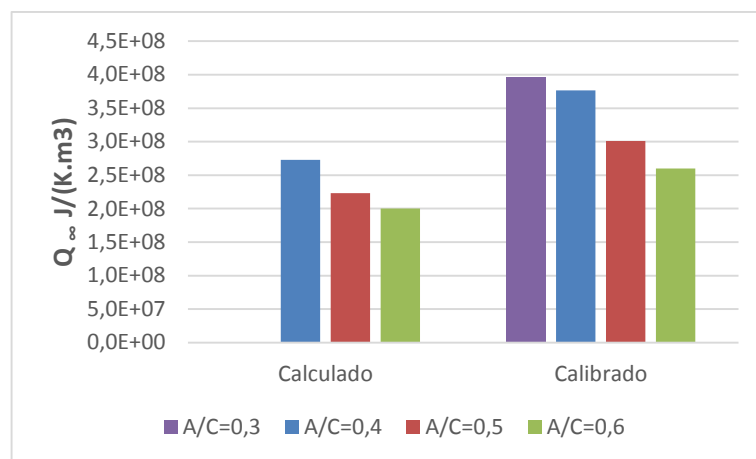


Figura 5.16 – Comparação de Resultados de Calor Total Gerado para Cimento A

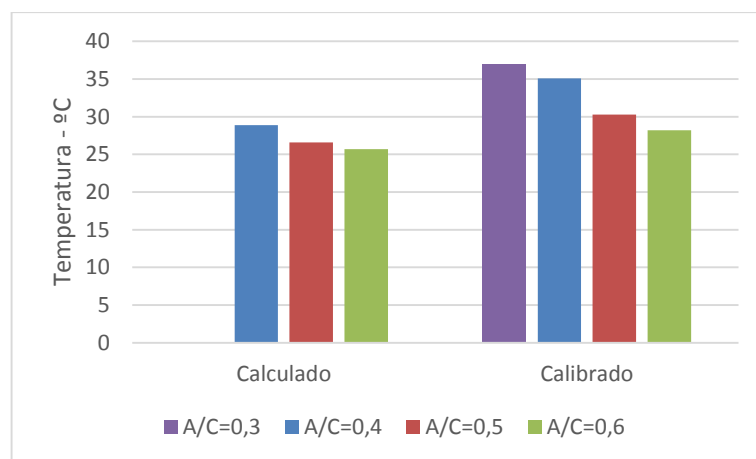


Figura 5.17 – Comparação de Resultados de Temperatura Máxima para Cimento A

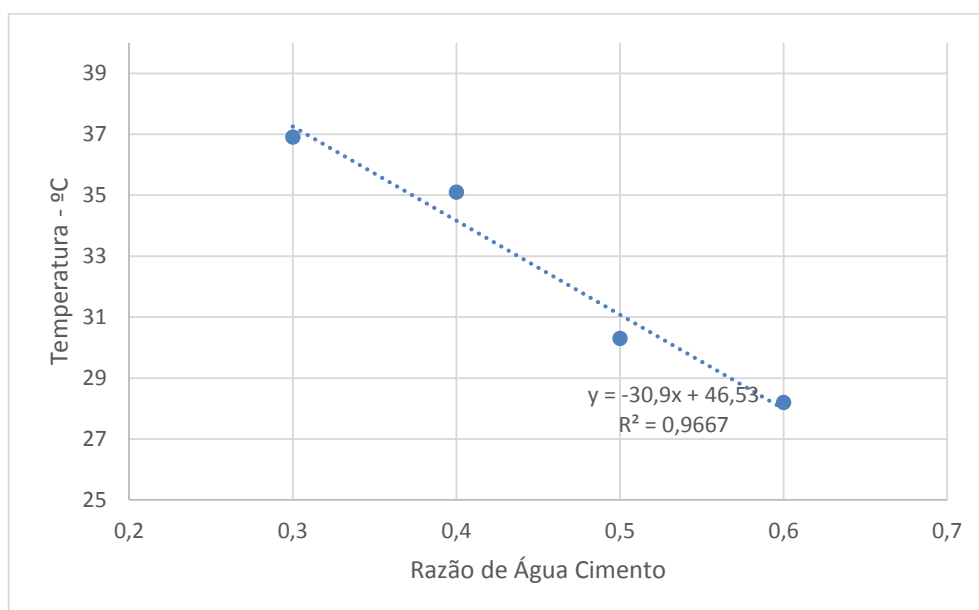


Figura 5.18 – Relação entre Razão Água Cimento e Temperatura Máxima

Seguindo a metodologia usada em Figura 4.22, em que se relaciona a temperatura máxima gerada com a razão de água cimento, obteve-se um declive de reta com o valor 30,9 sendo então ligeiramente inferior ao 43,39 registado no ensaio de diferentes razões de água cimento em pastas (capítulo 4.2), assim como uma variância igual de 96%.

Tabela 5.24 – Resumo de Resultados para Cimento A

Mistura	Temperatura		Calor Total	
	Calculado	Calibrado	Calculado	Calibrado
A/C=0,3	36.9		3.96E+08	
A/C=0,4	28.9	35.1	2.73E+08	3.77E+08
A/C=0,5	26.6	30.3	2.23E+08	3.01E+08
A/C=0,6	25.7	28.2	2.00E+08	2.60E+08

Tabela 5.25 – Resumo de Resultados para Cimento B

Mistura	Temperatura		Calor Total	
	Calculado	Calibrado	Calculado	Calibrado
A/C=0,3	45.4		3.90E+08	
A/C=0,4	32.6	42.3	2.68 E+08	3.71 E+08
A/C=0,5	29.3	34.7	2.20E+08	2.97E+08
A/C=0,6	28	31.7	1.97 E+08	2.53E+11

5.3.3. MODELAÇÃO DA ARGAMASSA DE REFERÊNCIA

Procedeu-se à modelação da argamassa de alto desempenho de referência com o objetivo de compreender o efeito da areia fina na mistura em comparação com as pastas previamente estudadas, no processo de geração de calor.

Este estudo foi dividido em duas partes: primeiramente foi realizada uma modelação nas condições apresentadas na sala de laboratório no ensaio das argamassas, e posteriormente procedeu-se à modelação nas condições iguais às existentes no ensaio das pastas. A diferença de condições consiste na definição da temperatura ambiente e da temperatura da argamassa no momento de entrada no molde.

A razão das duas modelações vai ao encontro de proporcionar uma correta comparação entre resultados com os registados no ensaio das pastas, e também uma interpretação do efeito que diferentes condições climáticas podem ter no comportamento térmico do betão.

Em função das proporções definidas na Tabela 4.10 dos diversos componentes da mistura, obteve-se os seguintes parâmetros:

Tabela 5.26 – Características da Argamassa de Referência

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONDUC	2.63E+00	2.63E+00
CAPACI	2.11E+06	2.11E+06
MAXPRD	1.99E+08	1.96E+08
ALPHA	1.17E+11	1.94E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	31	34.2
T_{máx} (Molde)	30.96	30.96

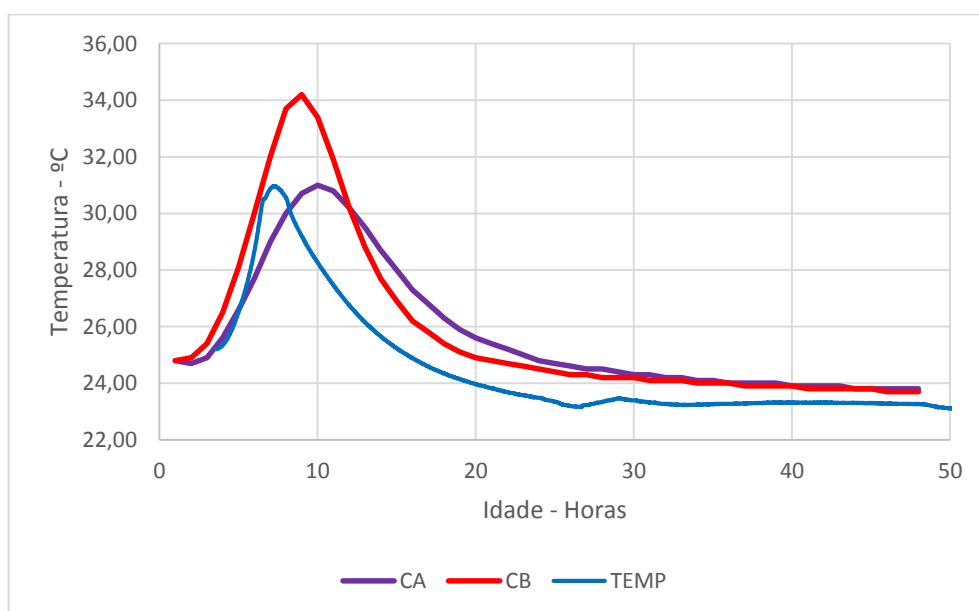


Figura 5.19 – Modelação da Argamassa de Referência

Tabela 5.27 – Variação de Valores de Temperatura Máxima da Argamassa de Referência

T_{méd} (DIANA)	32.6
T_{máx} (Molde)	30.96
Variação	5%

A modelação nas condições realmente verificadas na altura do ensaio produziu resultados de temperatura na ordem de valor dos esperados, embora o formato das curvas tal como já tinha sido verificado no ensaios das pastas, não corresponde ao realmente registado no ensaio. A razão desta diferença de forma das curvas advém dos valores usados como parâmetros de referência. A sua alteração obrigava a que fosse realizado um estudo rigoroso da libertação de calor proveniente da reação de hidratação do cimento através do uso de um calorímetro, para as diferentes misturas.

Graças a uma interpretação dos resultados modelados obtidos pode-se verificar um registo de temperatura superior aos verificados no ensaio das argamassas de alto desempenho. A variação de 5%

poderia levar a uma calibração do resultado, mas para esta situação, que não era a principal análise deste estudo, considerou-se que não era necessário, visto que a caracterização do comportamento da argamassa foi bastante parecido com a realidade.

O estudo de comparação da argamassa de referência foi realizado apenas com a pasta de razão de água cimento igual a 0,3, devido ao facto de esta ser a pasta com uma razão de água cimento mais próxima. Este estudo contou apenas com uma comparação das curvas obtidas pela modelação realizada no capítulo 5.3.2 e com as curvas modeladas para os cimentos das duas empresas em estudo nas condições iguais às da modelação das pastas cimentícias. Os resultados obtidos dos parâmetros de estudo da argamassa de referência nas condições previamente descritas foram:

Tabela 5.28 – Características da Argamassa de Referência em Condições iguais à do ensaio das Pastas

Parâmetros	Cimento A	Cimento B
CONDUC	2.63E+00	2.63E+00
CAPACI	2.11E+06	2.11E+06
MAXPRD	1.99E+08	1.96E+08
ALPHA	1.17E+11	1.94E+11
ARRHEN	5271.83	5337.98
HYDRAT DGRINI	1.00E-02	1.00E-02
CONVEC	6.2	6.2
T_{máx} (DIANA)	26	28.6
T_{máx} (Molde)	30.96	30.96

Com base nos dados da Tabela 5.26 e da Tabela 5.28, procedeu-se à comparação da diferença de comportamentos térmicos das argamassas para diferentes condições iniciais, fazendo-se variar a temperatura inicial do ensaio assim como a temperatura da mistura no momento de entrada no molde. Os resultados obtidos são os seguintes:

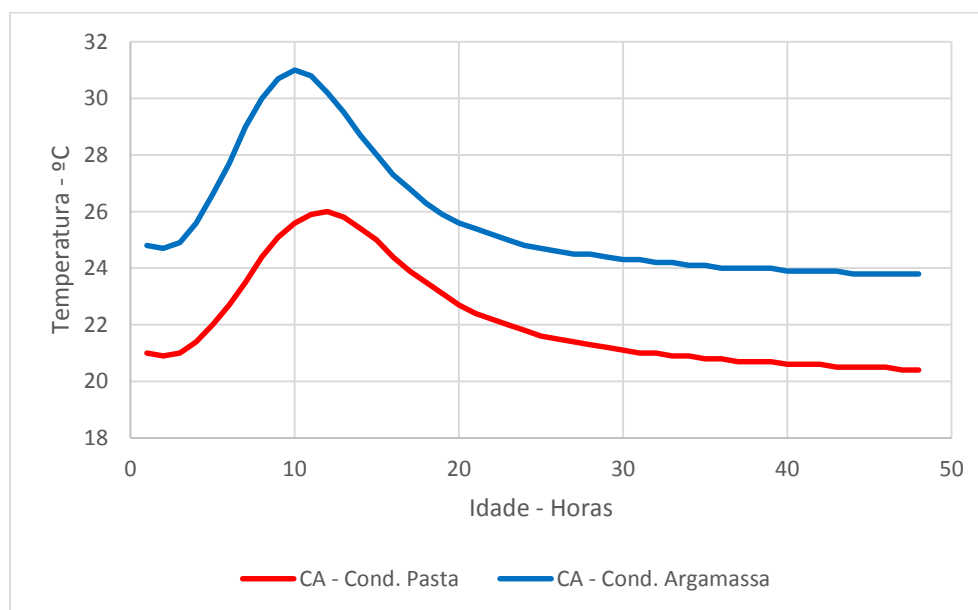


Figura 5.20 – Diferença de Condições de temperatura Iniciais

Comparando o comportamento das argamassas em diferentes condições de temperatura iniciais, obteve-se curvas praticamente paralelas ao longo de todo o ensaio, podendo-se concluir que a variação da temperatura ambiente do ensaio e respetivamente, a temperatura inicial da argamassa, não afetou o processo de geração de calor.

Este facto não é sempre sempre verídico, porque para variações de temperatura muito grandes a definição dos parâmetros característicos da argamassa também sofrerá diferenças, visto que estes estão diretamente ligados à variação de temperatura, podendo então sofrer variações significativas que resultarão numa alteração das curvas de temperatura obtidas.

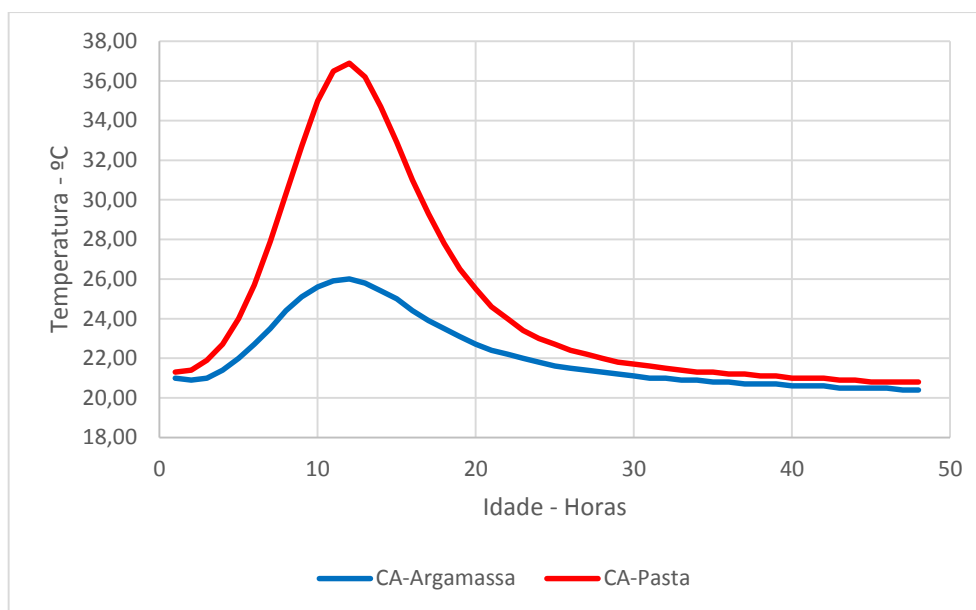


Figura 5.21 – Diferença de temperatura entre Pasta e Argamassa

Para as mesmas condições de temperatura iniciais a diferença entre curvas de uma pasta de razão de água cimento de 0,3 e uma argamassa de razão de água cimento de 0,32 é muito significativa, verificando-se um aumento de temperatura máxima na ordem dos 42% graças a uma diferença de temperatura de 10,9 °C.

As diferenças de temperatura devem-se à presença da areia na mistura, que altera as condições de condutibilidade térmica, de calor específico e limita a reação química do cimento com a água.

Tabela 5.29 – Variação de Temperatura para diferentes condições iniciais

T_{máx} (Cond. Pasta)	36.90
T_{máx} (Cond. Argamassa)	26.00
Variação	42%

6

CONCLUSÃO E PERSPETIVAS FUTURAS

6.1. CONCLUSÃO

Os principais objetivos da presente dissertação foram o estudo do comportamento térmico de betões de elevado desempenho, tanto em ensaios realizados em condições controladas em laboratório como também através ao uso de modelação numérica. Estes objetivos foram cumpridos inicialmente com a realização de ensaios de pastas e argamassas de elevado desempenho em moldes instrumentados, e posteriormente, procedeu-se à modelação numérica com o programa DIANA, comparando-se por fim os resultados obtidos em ambas.

O estudo do comportamento térmico das pastas e argamassas de elevado desempenho permitiu concluir que, com a redução da razão de água cimento das pastas, e consequente aumento da quantidade total de cimento por unidade de volume, se geram grandes aumentos de produção de calor, verificados num aumento da temperatura máxima registada, assim como uma aceleração da hidratação do cimento. A presença de inertes finos nas misturas de argamassas conduz a uma redução significativa do calor gerado e a redução para quase metade do tempo de hidratação do cimento.

Apesar de se verificarem algumas variações que se devem à falta de calibração da convecção térmica, do uso de dados aproximados da taxa de geração de calor (uma vez que não foi possível realizar um ensaio num calorímetro adiabático) e da incerteza do efeito do uso de superplastificante na hidratação do cimento nas misturas, a modelação numérica permitiu gerar curvas e diagramas de temperatura que seguem o comportamento verificado nos ensaios. É expectável que com uma modelação total do molde, tendo em conta todas as condições de transmissão de calor com o exterior e uma correta caracterização da geração de calor (através do uso do calorímetro) das várias misturas, os resultados obtidos estejam mais próximos dos obtidos nos ensaios.

O estudo da resistividade nos ensaios das pastas e argamassas permitiu a verificação de duas observações já verificadas anteriormente. Com o aumento da razão de água cimento a resistividade tende a diminuir, resultando numa redução da resistência do betão. A presença de inertes finos na mistura aumenta muito a resistividade lida, sendo esperado um grande aumento da resistência final.

As adições nas argamassas, com exceção do Metacaulino que teve um comportamento muito parecido com a argamassa de referência, proporcionaram significativas alterações no comportamento térmico. Verificou-se que a Sílica de fumo conduziu a um grande aumento da produção de calor, assim como uma aceleração do processo de hidratação do cimento e também que, o Pó de vidro teve um comportamento retardador da hidratação. As resistividades lidas no ensaio das argamassas mostraram um significativo aumento da resistência na adição da Sílica de fumo e ainda maior na adição do Metacaulino. A resistência final esperada pela adição de Pó de vidro na mistura é muito parecida com a obtida numa argamassa sem adições.

Apesar das interessantes capacidades demonstradas pelo molde instrumentado, e do sucesso das leituras obtidas no controlo da temperatura e da resistividade, o estudo da transmissão de ultrassons não decorreu como seria esperado, devido ao mau comportamento do gel acoplante. As leituras mostraram em certos pontos alguma discrepância de valores, não possibilitando uma correta caracterização das pastas e argamassas, mas permitiram no entanto uma boa interpretação do processo de endurecimento nas primeiras idades.

6.2. PERSPETIVAS FUTURAS

De maneira a garantir uma correta leitura da temperatura por parte do sensor de temperatura localizado no centro da base, deverá proceder-se à elevação do molde nos ensaios, de maneira a garantir a não ocorrência de contacto direto com a mesa metálica. Também se deve projetar um novo molde com a capacidade de leitura da temperatura em vários pontos, com especial importância no centro do molde. O desenvolvimento de um molde com vários sensores de temperatura providenciará mais informações, de elevada importância para uma correta calibração da convecção térmica atuante, e do comportamento térmico das misturas.

É necessária a realização de um estudo rigoroso da convecção térmica graças a uma modelação do próprio molde, porque a localização das aberturas para a leitura da velocidade de transmissão de ultrassons, a presença das malhas metálicas para o estudo da resistividade e as aberturas de saída das mesmas, são fontes de grande saída de calor, alterando as condições ideais de estudo, obrigando à definição de diferentes convecções térmicas para cada face.

Deverá ser feito um estudo da hidratação das pastas, com respetivo superplastificante e adição das várias misturas num calorímetro adiabático, de maneira a proporcionar maior confiança nos dados usados, e uma redução das aproximações que comprometem o resultado final obtido nos programas de modelação numérica. Este estudo providenciará maior rigor na taxa máxima de produção de calor mas também, numa definição melhor da função de taxa de geração de calor, conduzindo possivelmente a uma superior semelhança com os resultados obtidos nos ensaios em laboratório.

O molde instrumentado proporcionou com sucesso resultados em todos os estudos a que foi sujeito, mas encontra-se limitado ao uso de outros aparelhos eletrónicos para o estudo da velocidade de transmissão de ultrassons e da resistividade. Portanto, com o interesse de aumentar o automatismo e redução do custo do molde, deverá ser idealizada uma possibilidade de estudo destas variáveis com o complemento de uso de um dispositivo eletrónico de baixo custo tipo Arduino ou Raspberry Pi. Através da capacidade de processamento avançada, o uso destes dispositivos poderá permitir o acoplamento de outros componentes desenvolvidos para a leitura destes ensaios não destrutivos.

BIBLIOGRAFIA

- ADD-THERM - Sensores Analógicos IC's - LM35. (2013). Disponível em WWW: <<http://www.addtherm.com.br/medicao-termica/sensores-de-temperatura-lm35/>>.
- Azenha, Miguel - Numerical Simulation of the Structural Behaviour of Concrete Since its Early Ages. (2009).
- Azenha, Miguel Ângelo Dias - Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica. (2004).
- Branco, Fernando A; Mendes, P; Mirambell, E - Heat of hydration effects in concrete structures. *ACI Materials Journal*. Vol. 89. n.º 2 (1992). 0889-325X
- Caetano, Hugo Filipe dos Santos - Ensaaios não destrutivos para a caracterização de materiais cimentícios nas primeiras idades. (2013).
- Carino, V.M. Malhotra and N.J. - Handbook on nondestructive testing of concrete. (2004).
- Catologue, Proceq - Portable Concrete Testing Instruments For Non-Destructive Site Investigation. (2007).
- D-Robotics - DHT11 Humidity & Temperature Sensor. (2010).
- Ferreira, Denise Carina Santos - Identificação e modelação do comportamento de estruturas de betão nas primeiras idades. (2009).
- Herman, Rhett - An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics*. Vol. 69. n.º 9 (2001). p. 943-952. 0002-9505
- Hughes, BP; Soleit, AKO; Brierley, RW - New technique for determining the electrical resistivity of concrete. *Magazine of concrete research*. Vol. 37. n.º 133 (1985). p. 243-248. 1751-763X
- Hunkeler, F - The resistivity of pore water solution—a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. *Construction and Building Materials*. Vol. 10. n.º 5 (1996). p. 381-389. 0950-0618
- Incorporated, Texas Instruments - LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. (2013). Disponível em WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>.
- John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham - Testing of Concrete in Structures, 4th Ed. (2006).
- Jonasson, Jan-Erik - Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete. (1994). 0348-8373
- Keithley - 50MHz Arbitrary Waveform Function Generator. (2013). Disponível em WWW: <<http://www.keithley.com/products/dcac/waveform/arb/?mn=3390>>.
- Ladyada - TMP36 Temperature Sensor. (2013).
- Lura, P; Breugel, K van - Thermal properties of concrete: sensitivity studies. *IPACS document, Subtask*. Vol. 2. (2001).
- Maekawa, Koichi; Chaube, Rajesh; Kishi, Toshiharu - Modelling of concrete performance. 1999. 0419242007
- Neville, Adam M - Properties of Concrete, 4th. Pearson Education Limited, Essex, England, 1995.
- P. C. Silva, R. M. Ferreira, H. Figueiras - Medições de Resistividade Elétrica Avaliada em Provetes de Betão. *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL*. (2012).
- Polder, Rob B - Test methods for on site measurement of resistivity of concrete—a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and building materials*. Vol. 15. n.º 2 (2001). p. 125-131. 0950-0618
- Rao, Singiresu S - The finite element method in engineering. Butterworth-heinemann, 2005. 0750678283
- Rio, João; Figueiras, Joaquim - Deteção de dano com ultrasons em elementos de betão estrutural. *Encontro Nacional de Betão Estrutural (BE2012)*. p. 24-26.
- Sampaio, Célia Manuela Costa Pereira - Caracterização do Betão através de técnicas não-destrutivas. (2010).
- Silva, Bruno Joel Martins da - Estruturas inteligentes utilizando betão e polímero reforçado com fibras de carbono. (2005).
- Silva, P. C. F. - Resistividade Elétrica e o Controlo de Qualidade do Betão. (2011).

- Soriano, Humberto Lima; LIMA, SILVIO DE SOUZA - Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas Vol. 48. Edusp, 2003. 8531407303
- Whiting, David A; Nagi, Mohamad A - Electrical resistivity of concrete-a literature review. *R&D Serial*. n.º 2457 (2003).
- Ziehl - Pt100-Temperature-Sensors Type TF101. (2013). Disponível em WWW: <http://www.ziehl.de/ziehl/englisch/temperature_monitoring/5pt100sensoren_e.pdf>.

ANEXOS

Anexo A - Definição do código de dados final de programação do Arduino:

```
// Ensaio e Modelação de Comportamento Térmico de Betões de Elevado Desempenho nas Primeiras
Idades
// Programa de Aquisição e Registo em Memória Auxiliar
// Leitura de Temperatura no interior do Molde (LM35) e Temperatura e Humidade Ambiente (DHT11)
// Valores em Tempo Real graças a Ecrã LCD 16x2
// Registo de Dados em ficheiro .csv graças a Cartão de Memória SD
// Desenvolvido por Luís Oliveira
#include <LiquidCrystal.h> // Biblioteca do Ecrã LCD 16x2
#include <dht11.h> // Biblioteca do Sensor de Temperatura e Humidade DHT11
#include <SD.h> // Biblioteca SD Card
// Ecrã LCD 16x2
LiquidCrystal lcd(8, 7, 5, 1, 3, 2);
// Cartão SD
const int CS_pin = 4;
int Temp, Humidity, hCheck, Temperatura;
#define tempPin 0 // Pino do Sensor de Temperatura LM35
#define humidityPin 6 // Pino do Sensor de Temperatura e Humidade DHT11
dht11 DHT11;
long id= 1; // Identificação da medição id#
// Inicializar Biblioteca LCD e pinosEnsaio e Modelação de Comportamento Térmico de Betões de
Elevado Desempenho nas Primeiras Idades
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ;
  }
  lcd.begin(16, 2);
  Serial.println("A Iniciar Cartao SD:");
  pinMode(10, OUTPUT);
```

```
// Iniciar o SD
if (!SD.begin(CS_pin))
{
  Serial.println("Falha no Cartao SD");
  return;
}
Serial.println("Cartao SD Pronto");
delay(10000);
// Ficheiro de registo de dados (DADOS.txt)

File logFile = SD.open("DADOS.csv", FILE_WRITE);
if (logFile)
{
  logFile.println(", , ,"); // Linha branca caso já existam informações existentes no ficheiro
  String header = "ID, TempINT, Humidade, TempEXT";
  logFile.println(header);
  logFile.close();
  Serial.println(header);
}
else
{
  Serial.println("Nao foi possível abrir ficheiro de dados");
}
}

void loop()
{
  // Leitura da Temperatura Interior
  Temp = (0.00488 * analogRead(tempPin) * 100.0);
  delay(10);
  //Leitura da Humidade Ambiente
  hCheck = DHT11.read(humidityPin);
  if(hCheck != 0)
```

```
Humidity = 255; //Must be an error
```

```
else
```

```
Humidity = DHT11.humidity;
```

```
delay(10);
```

```
//Leitura da Temperatura Ambiente
```

```
Temperatura = DHT11.temperature;
```

```
showData(Temp, Humidity, Temperatura);
```

```
Serial.print("TempINT:");
```

```
Serial.println(Temp);
```

```
Serial.print("Humidade:");
```

```
Serial.println(Humidity);
```

```
Serial.print("TempEXT:");
```

```
Serial.println(Temperatura);
```

```
delay(1000);
```

```
// Iniciar String de Registo no Cartão SD
```

```
String dataString = String(id) + ", " + String(Temp) + ", " + String(Humidity) + ", " +
```

```
String(Temperatura);
```

```
// Iniciar registo em Ficheiro .csv
```

```
File logFile = SD.open("DADOS.csv", FILE_WRITE);
```

```
if (logFile)Ensaio e Modelação de Comportamento Térmico de Betões de Elevado Desempenho nas  
Primeiras Idades
```

```
{
```

```
logFile.println(dataString);
```

```
logFile.close();
```

```
Serial.println(dataString);
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
Serial.println("Não foi possível abrir ficheiro de dados");
```

```
}
```

```
// Aumento do Número ID
id++;

showData(Temp, Humidity, Temperatura);
Serial.print("Interior:");
Serial.println(Temp);
Serial.print("Humidade:");
Serial.println(Humidity);
Serial.print("Tampa:");
Serial.println(Temperatura);
delay(6000);
}

// Apresentação dos dados a Tempo Real no LCD 16x2
void showData (int Temp, int Humidity, int Temperatura)
{
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("TempINT=") + lcd.print(Temp) + lcd.print(char ( 0xdf)) + lcd.print("C");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("EXT: H=") + lcd.print(Humidity) + lcd.print("%");
  lcd.setCursor(10,1);
  lcd.print("T=") + lcd.print(Temperatura) + lcd.print(char ( 0xdf)) + lcd.print("C");
```

Anexo B - Definição da geometria do modelo definida num ficheiro de texto com a extensão “.BAT”

```
FEMGEN LUIS
PROPERTY FE-PROG DIANA HEAT_3D
YES
UTILITY SETUP UNITS LENGTH METER
UTILITY SETUP UNITS FORCE NEWTON
UTILITY SETUP UNITS TIME SECOND
UTILITY SETUP UNITS TEMPERATURE CELSIUS
UTILITY SETUP UNDO ON
UTILITY SETUP BINSET OFF
MESHING OPTIONS CHECK STRUCTURED OFF

GEOMETRY POINT COORD P1 0 0 0
GEOMETRY POINT COORD P2 0.1 0 0
GEOMETRY POINT COORD P3 0.1 0.1 0
GEOMETRY POINT COORD P4 0 0.1 0

GEOMETRY POINT COORD P5 0 0 0.1
GEOMETRY POINT COORD P6 0.1 0 0.1
GEOMETRY POINT COORD P7 0.1 0.1 0.1
GEOMETRY POINT COORD P8 0 0.1 0.1

GEOMETRY SURFACE 4POINTS S1 P1 P2 P3 P4
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S2 P5 P6 P7 P8
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S3 P1 P2 P6 P5
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S4 P2 P3 P7 P6
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S5 P3 P4 P8 P7
GEOMETRY SURFACE 4POINTS S6 P4 P1 P5 P8
GEOMETRY BODY 6SURFS S1 S2 S3 S4 S5 S6

EYE FRAME ALL
```

CONSTRUCT SET BETAO APPEND BODIES ALL
CONSTRUCT SET FRONT APPEND SURF S1 S2 S3 S4 S5 S6

MESHING TYPES BETAO HE8 HX8HT
MESHING TYPES FRONT QU4 BQ4HT
MESHING DIVISION ELSIZE ALL 0.025
MESHING GENERATE
VIEW MESH
MESHING MERGE ALL .1E-4

PROPERTY MATERIAL MA1 EXTERNAL EXTERNAL "betao.dat"
PROPERTY MATERIAL MA2 EXTERNAL EXTERNAL "front.dat"

PROPERTY ATTACH BETAO MATERIAL MA1
PROPERTY ATTACH FRONT MATERIAL MA2

PROPERTY LOADS EXTTEMP FRONT 19.8
CONSTRUCT TCURVE TC1 LIST 0 1 1209600 1
PROPERTY ATTACH LOADCASE 1 TC1

PROPERTY INITIAL INITEMP BETAO 21.26

Anexo B - Definição das propriedades do corpo com a extensão “.dat”:

```
CONDUCT 1.77E+00
CAPACI 2.85E+06
REACTI 0.00 0.05 0.10 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40
        0.45 0.50 0.55 0.60 0.65 0.70 0.75 0.80 0.85
        0.90 0.95 1.00
PRDKAR 0.00 0.65 0.91 1.00 0.98 0.94 0.86 0.75 0.63
        0.51 0.41 0.32 0.24 0.18 0.13 0.09 0.06 0.04
        0.02 0.01 0.00
MAXPRD 3.96E+08
ALPHA 2.33E+11
ARRHEN 5271.831
```

Definição das propriedades da fronteira com a extensão “.dat”:

```
CONVEC 6.2
```

Definição das propriedades da análise térmica com a extensão “.dcf”:

```
*FILOS
INITIA
*HEATTR
BEGIN INITIA
BEGIN NONLIN
  EQUAGE ON
  HYDRAT DGRINI=0.01
END NONLIN
TEMPER INPUT
END INITIA
BEGIN EXECUT
  SIZES 3600(48)
END EXECUT
BEGIN OUTPUT FEMVIEW BINARY
  TEMPER
END OUTPUT
*END
```