



Diogo Martins Duarte

RESISTÊNCIA MECÂNICA DO BETÃO CURADO EM CONDIÇÕES ADIABÁTICAS

MECHANICAL RESISTANCE OF CONCRETE CURED
IN ADIABATIC CONDITIONS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes e pelo Professor Doutor Sérgio Manuel Rodrigues Lopes

Coimbra, 20 de Setembro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Diogo Martins Duarte

RESISTÊNCIA MECÂNICA DO BETÃO CURADO EM CONDIÇÕES ADIABÁTICAS

MECHANICAL RESISTANCE OF CONCRETE CURED IN ADIABATIC CONDITIONS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas,
orientada pelo Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes e pelo Professor Doutor Sérgio Manuel Rodrigues Lopes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 20 de Setembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Durante o meu percurso académico e ao longo da realização da presente dissertação contei com o apoio de várias pessoas às quais estou profundamente grato.

Em primeiro lugar, exprimo a minha gratidão ao Professor Doutor Adelino Vasconcelos Lopes pela orientação prestada, pelo seu incentivo, apoio e disponibilidade que sempre demonstrou.

Ao Professor Doutor Sérgio Manuel Rodrigues Lopes pela disponibilidade e apoio prestados neste trabalho.

Aos Funcionários do Laboratório de Estruturas, Mecânica Estrutural e Construções do departamento de engenharia civil da Universidade de Coimbra e ao Engenheiro Ilídio pela disponibilidade e ajuda prestada na realização deste trabalho.

Á minha família pelo amor e apoio que sempre me demonstraram e que tornou possível concluir este objetivo na minha vida.

Aos meus colegas e amigos pela solidariedade, ajuda e carinho durante este tempo nas nossas vidas. Espero encontrar-vos muitas vezes no futuro para aprender com as vossas experiências, reviver bons momentos e criar novas recordações.

A todos um grande Obrigado.

RESUMO

As grandes estruturas de betão, tais como as barragens, as pontes, etc, apresentam um elevado potencial para fissurar, em resultado de tensões induzidas por gradientes de temperatura gerados no interior do betão. Estes gradientes de temperatura ocorrem quando o calor gerado no betão é dissipado para o meio envolvente. Nestas condições, a temperatura na superfície do betão é inferior à verificada no interior; daí as tensões de tração no betão superficial. Como este fenómeno se verifica no início do endurecimento do betão, é fácil as tensões de tração serem superiores à sua resistência à tração, provocando fissuras, que em última instância afetam a integridade e a durabilidade da estrutura.

Trabalhos existem onde se estudaram as questões térmicas. Conhece-se relativamente bem o poder calorífico e o coeficiente de transmissibilidade destes materiais enquanto maciços infinitos, mas não se conhece com o devido rigor quais as consequências da temperatura de cura na resistência destes materiais.

Na presente dissertação pretende-se avaliar as alterações das propriedades resistentes de um betão em condições adiabáticas semelhantes a um maciço infinito. Para o efeito foram construídos diversos cubos, curados a diversas temperaturas, onde se tentou compreender a evolução da resistência ao longo do tempo. Relativamente às temperaturas de cura, a análise foi iniciada colocando os provetes em condições ambientais e depois em ambiente controlado, usando uma estufa para o efeito.

Palavras-chave: betão; temperatura de cura; resistência à compressão; propriedades térmicas

ABSTRACT

Large concrete structures, such as dams and bridges, have a high potential for cracking due to tensions induced by temperature gradients generated inside the concrete. These temperature gradients occur when heat generated in the concrete is dissipated into the surrounding environment. In these conditions, the concrete surface temperature is lower than one observed in the interior; hence the tensile stresses in the surface concrete. Since this phenomenon occurs at the beginning of concrete hardening, it is easy for tensile stresses to exceed the concrete tensile strength, causing cracks, which ultimately affect the integrity and durability of the structure.

Works exist where the thermal issues were studied. The calorific value and the coefficient of transmissibility of these materials as infinite masses are known relatively well. But the consequences of the curing temperature on the strength of these materials are not known with due rigor.

In the present dissertation it is intended to evaluate the changes of the resistant properties of a concrete subject to different curing temperatures. For this purpose, several cubes cured at different temperatures were built, where an attempt was made to understand the evolution of the resistance over time. Regarding the curing temperatures, the analysis began by placing the test specimens under ambient conditions and then in a controlled environment using a greenhouse for this purpose.

Keywords: concrete; curing temperature; compressive strength; thermal properties

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Objetivos da dissertação.....	1
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 CONCEITOS BÁSICOS.....	3
2.1 Considerações iniciais.....	3
2.2 Hidratação do Cimento.....	4
2.3 Propriedades mecânicas e térmicas do betão.....	9
2.3.1 Influência dos materiais constituintes da mistura.....	9
2.3.2 Influência da temperatura de cura.....	12
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	17
3.1 Considerações iniciais.....	17
3.2 Materiais.....	17
3.2.1 Cimento.....	17
3.2.2 Areia.....	17
3.2.3 Brita calcária.....	18
3.2.4 Água.....	18
3.2.5 Aditivo.....	18
3.3 Principais Equipamentos.....	19
3.3.1 Estufa.....	19
3.3.2 Data logger.....	19
3.3.3 Termopares.....	20
3.3.4 Misturadora.....	20
3.3.5 Mesa vibratória.....	20
3.3.6 Prensa hidráulica.....	21
3.4 Preparação das Misturas.....	21
3.4.1 Aspetos Comuns.....	21
3.4.2 Misturas.....	24
4 RESULTADOS.....	28
4.1 Considerações iniciais.....	28
4.2 Aspetos comuns.....	28
4.3 Provetes da Mistura 1.....	30
4.4 Provetes da Mistura 2.....	33
4.5 Provetes da Mistura 3.....	36
4.6 Provetes da Mistura 4.....	40

4.7 Provetes da Mistura 5	43
4.8 Provetes da Mistura 6	46
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	49
5.1 Considerações iniciais	49
5.2 Evolução da Temperatura dos Provetes Interiores	49
5.3 Impactos na temperatura do provete devido a ΔT	51
5.4 Tensão resistente à compressão	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6.1 Considerações Finais	62
6.2 Conclusões	62
6.3 Trabalhos futuros	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução típica de calor durante a hidratação do cimento Portland (The Concrete Portal@, 2017).....	6
Figura 2.2 – Progresso da Hidratação do Cimento (The Concrete Portal@, 2017).....	9
Figura 2.3 – Relação entre o rácio água/cimento e a resistência à compressão do betão (The Concrete Portal@, 2017).....	10
Figura 2.4 – Relação entre o rácio “gel-space” e a resistência à compressão do betão (The Concrete Portal@, 2017).....	10
Figura 2.5 – Evolução da Temperatura no Provelte. Misturas Pan20141104 e Pan20141106 (Longo, 2016).....	11
Figura 2.6 – Resultados experimentais da tensão de compressão (Kim et al, 2002).....	12
Figura 2.7 – Curvas ajustadas entre a resistência à compressão e a idade de cura em diferentes temperaturas (Fan et al, 2017).....	13
Figura 2.8 – Resistência à compressão de pastas de cimento CSA curadas a várias temperaturas aos 1, 3, 7 e 28 dias (Wang et al, 2017).....	14
Figura 3.1 – Estufa.....	18
Figura 3.2 – Data logger.....	19
Figura 3.3 – Mesa vibratória.....	19
Figura 3.4 – Colocação dos termopares no provete e molde de controlo.....	21
Figura 3.5 – Curvas Granulométricas dos agregados e da mistura.....	25

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição do cimento (Kim et al, 2002).....	12
Tabela 2.2 – Composição do cimento (Fan et al, 2017).....	13
Tabela 2.3 – Composição do clínquer de CSA e da Anidrita em % (Wang et al, 2017).....	14
Tabela 3.1 – Composição elementar da areia.....	17
Tabela 3.2 – Granulometria da areia.....	17
Tabela 3.3 – Granulometria da brita.....	17
Tabela 3.4 – Características da realização das misturas.....	26
Tabela 3.5 – Quantidades de materiais das misturas.....	26
Tabela 5.1 – Resumo de resultados característicos das misturas.....	49
Tabela 5.2 – Resumo dos resultados dos Provetes Exteriores.....	57
Tabela 5.3 – Resumo dos resultados dos Provetes Interiores.....	59

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 1.....	29
Gráfico 4.2 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 1.....	30
Gráfico 4.3 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 1.....	30
Gráfico 4.4 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 1.....	31
Gráfico 4.5 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 1.....	31
Gráfico 4.6 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 2.....	32
Gráfico 4.7 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 2.....	33
Gráfico 4.8 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 2.....	33
Gráfico 4.9 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 2.....	34
Gráfico 4.10 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 2.....	34
Gráfico 4.11 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 3.....	36
Gráfico 4.12 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 3.....	36
Gráfico 4.13 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 3.....	37
Gráfico 4.14 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 3.....	38
Gráfico 4.15 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 3.....	38
Gráfico 4.16 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 4.....	39
Gráfico 4.17 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 4.....	40
Gráfico 4.18 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 4.....	40
Gráfico 4.19 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 4.....	41
Gráfico 4.20 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 4.....	41
Gráfico 4.21 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 5.....	42
Gráfico 4.22 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 5.....	43
Gráfico 4.23 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 5.....	43
Gráfico 4.24 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 5.....	44
Gráfico 4.25 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 5.....	44
Gráfico 4.26 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 6.....	45
Gráfico 4.27 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 6.....	46
Gráfico 4.28 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 6.....	46
Gráfico 4.29 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 6.....	47
Gráfico 4.30 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 6.....	47
Gráfico 5.1 – Evolução das Temperaturas relativas registadas dos Provetes.....	48
Gráfico 5.2 – Evolução das Temperaturas relativas registadas. Misturas 2, 3 e 4. Misturas Pan20141104 e Pan20141106 (Longo, 2016).....	50
Gráfico 5.3 – Temperaturas registadas no provete e molde de controlo da Mistura 4 durante o ensaio.....	51

Gráfico 5.4 – Constante de proporcionalidade k entre ΔT_{prov} e ΔT	52
Gráfico 5.5 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 1.....	53
Gráfico 5.6 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 2.....	53
Gráfico 5.7 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 3.....	54
Gráfico 5.8 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 4.....	54
Gráfico 5.9 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 5.....	55
Gráfico 5.10 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 6.....	55
Gráfico 5.11 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Provetes Exteriores...	56
Gráfico 5.12 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Provetes Exteriores.....	57
Gráfico 5.13 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Provetes Interiores...	58
Gráfico 5.14 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Provetes Interiores.....	59

SIMBOLOGIA

Por ordem de aparecimento no texto.

Capítulo 2

$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_3S – silicato tricálcico, também designado por alite

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_2S – silicato dicálcico, também designado por belite

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A – aluminato tricálcico

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF – ferro aluminato de cálcio

CaO – óxido de cálcio

SiO_2 – dióxido de silício

Al_2O_3 – óxido de alumínio

Fe_2O_3 – óxido férrico

SO_3 – trióxido de enxofre

MgO – óxido de magnésio

Na_2O – óxido de sódio

K_2O – óxido de potássio

$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ ou C-S-H – silicatos de cálcio hidratados

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH – hidróxido de cálcio

C_3AH_6 – hidrogarnet cúbico

C_4AH_{13} e C_2AH_8 – hidratos cristalinos

$\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ou AF_t – sulfoaluminato de cálcio, também designado por etringite

$3\text{C}_4\text{AS}_3\text{H}_{18}$ ou AF_m – monossulfato

P_2O_5 – pentóxido de fósforo

Cl – cloro

TiO_2 – dióxido de titânio

SrO – óxido de estrôncio

ZrO_2 – dióxido de zircónio

MnO – dióxido de manganês

Capítulo 3

γ_{cimento} – massa volúmica do cimento

γ_{areia} – massa volúmica da areia

FeO – óxido de ferro

γ_{brita} – massa volúmica da brita
 $\gamma_{água}$ – massa volúmica da água
 V_a – volume de agregados
 V_b – volume de betão
 V_w – volume de água
 V_c – volume de cimento
 V_v – volume de vazios
 M_{areia} – massa de areia
 M_{brita} – massa de brita
 $M_{água}$ – massa de água
 $M_{cimento}$ – massa de cimento
 Δt – intervalo de tempo entre a adição de água à mistura e o fecho da estufa
 y_B – ordenada do ponto B da curva de referência de Faury
 D – dimensão máxima do agregado
 R – raio hidráulico
 A e B – parâmetros relacionados com a trabalhabilidade e meios de compactação empregados
 A – área em contacto com o betão
 d_1 – maior abertura do peneiro no qual já se recolhem as maiores partículas
 d_2 – abertura do peneiro seguinte
 x – percentagem do peso das partículas retidas no peneiro d_1
 y – percentagem do peso das partículas que passaram através de d_1 e ficaram retidas em d_2

Capítulo 4

T_{prov} – temperatura registada no provete de controlo
 T_{molde} – temperatura registada no molde de controlo
 $T_{centro,i}$ – temperatura registada no termopar i no centro do provete de controlo
 $T_{face,i}$ – temperatura registada na face i
 $T_{canto,i}$ – temperatura registada no canto i
 ΔT – diferença de temperatura entre o molde e o provete de controlo
 $\Delta T_{ma}(t)$ – média acumulada das diferenças de temperatura
 $F_{aplicada}$ – força aplicada no provete
 $F_{aplicada,max}$ – força máxima aplicada durante o ensaio de compressão
 $F_{aplicada,inicial}$ – força inicial exercida pela prensa antes de se registar o início do carregamento do provete
 A_{prov} – área da face do provete
 σ_c – tensão de rotura dos provetes ensaiados

R^2 – parâmetro que traduz o afastamento dos valores apresentados relativamente à linha de tendência

t – instante

Capítulo 5

“*Ganhos*” – representa os ganhos de temperatura no provete de controlo numa 1ª fase de crescimento mais acentuado

“*Taxa*” – indica a maior taxa de evolução da temperatura relativa do provete

T_0 – temperatura inicial do provete

T_{max} – temperatura máxima registada no provete

ΔT_{max} – temperatura relativa máxima

ΔT_{prov} – impacto provocado no provete devido às diferenças de temperatura entre o molde e o provete

k – constante de proporcionalidade entre ΔT_{prov} e ΔT

$T_{prov, ef}$ – temperatura efetiva do provete

σ_{1d} – tensão resistente á compressão estimada pelas linhas de tendência ao primeiro dia de cura

σ_{28d} – tensão resistente á compressão estimada pelas linhas de tendência ao vigésimo oitavo dia de cura

$\Delta\sigma$ – ganho de resistência entre o primeiro e vigésimo oitavo dia de cura.

“*Varição*” – comparação dos valores da tensão resistente de compressão exteriores e interiores

ABREVIATURAS

CPN – Cimento Portland Normal

CSA - Cimento de Sulfaloaluminato de Cálcio

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EN – Norma Europeia

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

LEMEC – Laboratório de Estruturas, Mecânica Estrutural e Construções do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

NP – Norma Portuguesa

PVC – Policloreto de Vinil

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

O betão e a argamassa são utilizados como materiais de construção há muitos de anos, tendo sido inicialmente produzidos pela mistura de argila ou argila margosa, areia, cascalho e água, havendo registos de que os materiais eram, quando necessários, transportados ao longo de quilómetros. Na atualidade, o betão resulta da aglutinação de inertes que derivam da natureza. As matérias-primas mais significativas são o calcário, a marga e a argila, extraídos de pedreiras onde a “lavra” – processo de extração - é desenvolvida a céu aberto, através do desmonte de rocha por explosivos.

Os materiais de construção feitos à base de cimento, os chamados “betões cimentícios”, podem ser considerados como os materiais mais importantes produzidos pelo homem, já que lhe possibilitou edificar todas as obras que garantem a sua vivência social, como por exemplo, as habitações, aquedutos, barragens, obras sanitárias, pontes, escolas, hospitais, entre outros tipos de construções. Deste modo, tornou-se um material que vem sendo largamente usado em todos os países do mundo, em todos os tipos de construção, em função de várias características positivas, tais como, economia, conservação, adaptabilidade, rapidez de construção, segurança contra o fogo, impermeabilidade, resistência aos choques e vibrações.

1.2 Objetivos da dissertação

As grandes estruturas de betão, como barragens, pontes, etc, apresentam um elevado potencial para fissurar, em resultado de tensões induzidas por gradientes de temperatura gerados no interior do betão. Estes gradientes de temperatura ocorrem quando o calor gerado no betão é dissipado para o meio envolvente. Nestas condições, a temperatura na superfície do betão é inferior à verificada no interior originando tensões de tração no betão superficial. Como este fenómeno se verifica no início do endurecimento do betão, é mais fácil as tensões de tração geradas serem superiores à sua resistência à tração. O que provocará fissuras, que em última instância poderão afetar a integridade e a durabilidade da estrutura.

Assim na presente dissertação, define-se como principal objetivo responder à seguinte questão: Qual a influência da temperatura de cura na resistência mecânica do betão? Para responder a esta questão foram construídos diversos cubos, recorrendo a misturas utilizando como ligante o cimento Portland. Os cubos serão divididos em dois grupos, metade destes serão curados em condições ambientais, enquanto que a outra metade será curada em condições adiabáticas semelhantes a maciços infinitos. Depois de curados, os provetes cúbicos serão ensaiados de modo a determinar a sua tensão resistente à compressão. Comparando os valores de resistência à compressão obtidos para os dois grupos será respondida a questão colocada anteriormente. Com este procedimento será também possível seguir o comportamento térmico do betão quando submetido a uma cura em condições adiabáticas semelhantes às de um maciço infinito.

Nas misturas utilizadas manteve-se a dosagem de cimento (cerca de 567 kg/m^3), fazendo variar o tipo e quantidade de agregados, tendo se adicionado também um superplastificante como aditivo na última mistura realizada.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se subdividida em 6 capítulos, sendo o primeiro capítulo destinado à introdução da mesma.

No segundo capítulo serão apresentados alguns conceitos importantes para o entendimento dos assuntos a tratar, assim como um breve estado da arte. Por último serão apresentados alguns estudos e resultados obtidos por outros autores.

O terceiro capítulo será destinado à identificação dos materiais e equipamentos utilizados na construção dos provetes ensaiados e ainda ao procedimento experimental adotado.

No quarto capítulo serão apresentados os resultados obtidos no decorrer do trabalho experimental. No quinto capítulo serão realizadas algumas análises dos resultados apresentados no capítulo anterior.

No sexto capítulo serão apresentadas as principais conclusões do trabalho e serão feitas algumas sugestões de trabalhos a desenvolver no futuro.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 Considerações iniciais

O betão pode ser descrito como um sistema de duas fases, composto por uma pasta ligante e agregados (The Concrete Portal@, 2017).

Uma das pastas ligantes mais utilizadas é a que resulta da reação de hidratação do Cimento Portland Normal (CPN). Um dos produtos da hidratação são os Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H), estes são de grande importância para a coesão e resistência da mistura (Appleton, 2013).

O CPN é formado principalmente a partir de um material calcário, como o calcário, ou giz, e a partir de alumina e sílica, como argila ou xisto. Marl, uma mistura de materiais calcários e argilosos também é utilizada. As matérias primas para a produção de cimento Portland encontram-se em praticamente todos os países, o que leva à existência de centrais de cimento a operar no mundo todo (Neville, 2004). Tal leva a que o betão seja o material de construção mais utilizado no mundo somente atrás da água (Hiremath e Yaragal, 2017).

O processo de produção do cimento consiste essencialmente na moagem das matérias primas, misturando-as intimamente em certas proporções e queimando-as em grandes fornos rotativos a temperaturas da ordem dos 1450°C quando o material se sintetiza e se funde parcialmente em bolas conhecidas como clínquer. O clínquer é então arrefecido e moído até ser tornar num pó fino ao qual se adiciona algum gesso. O produto resultante é o cimento Portland comercial amplamente utilizado em todo o mundo (Neville, 2004 e Appleton, 2013).

Durante a reação de hidratação do cimento, o calor de hidratação faz aumentar a temperatura interna do betão. Sendo o betão um material de baixa condutividade térmica, em estruturas de grande massa, como barragens e pontes, estabelecer-se-ão gradientes térmicos entre o interior e o exterior da estrutura. Adicionalmente as perdas de calor serão desiguais em diferentes secções da estrutura devido às grandes dimensões da mesma. Estas diferenças de temperaturas entre as superfícies internas e externas geram tensões de tração devidas a restrições internas e externas da estrutura. Se estas tensões de tração forem superiores à resistência à tração do betão

ocorrerão fissuras que em última instância afetam a integridade e durabilidade da estrutura (Ha et al, 2014; Xu et al, 2017; Uygunoglu et al, 2018).

2.2 Hidratação do Cimento

O conteúdo deste ponto é composto por conteúdos retirados das referências bibliográficas Neville (2004) e The Concrete Portal@ (2017).

O cimento é geralmente considerado como sendo principalmente composto por quatro compostos: dois silicatos, a alite ou silicato tricálcico e a belite ou silicato dicálcico, cujas fórmulas químicas são $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ e $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ respetivamente; e dois aluminatos, o aluminato tricálcico e o ferro aluminato de cálcio, cujas fórmulas químicas são $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Os quatro óxidos principais do cimento, em ordem decrescente são CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Noutros óxidos, em quantidades menores, importantes para o comportamento do cimento incluem-se SO_3 , MgO , Na_2O e K_2O .

É usual utilizar uma abreviação das fórmulas química sendo utilizada a seguinte notação: $\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$; $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$; $\text{MgO} = \text{M}$, $\text{Na}_2\text{O} = \text{N}$; $\text{SO}_4 = \underline{\text{S}}$, $\text{CO}_2 = \underline{\text{C}}$.

O clínquer de cimento Portland é tipicamente composto por 50-70% de alite (C_3S); 15-30% de belite (C_2S); 5-10% de aluminato tricálcico (C_3A) e 5-15% de ferro aluminato de cálcio (C_4AF), estes sendo as fases cristalográficas dominantes. A morfologia e composição destas fases podem variar significativamente dependendo do processo de fabricação e das matérias-primas utilizadas. Essas variações podem ter uma influência significativa na quantidade e taxa de evolução do calor durante a hidratação.

O sistema do cimento é complexo, podendo ser dividido em dois sistemas ternários primários: $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$.

O primeiro sistema contendo C, S e A inclui fases binárias que compõem 90% do cimento Portland. As relações da fase binária entre CaO e SiO_2 dão origem aos compostos C_3S e C_2S . Por outro, as relações da fase binária entre CaO e Al_2O_3 originam C_3A e C_{12}A_7 .

No segundo sistema, o ferro aluminato de cálcio (C_4AF) contém na realidade uma série de outros compostos em solução sólida.

As reações durante a hidratação do cimento podem ser divididas em dois grupos: (i) Reações envolvendo os silicatos e (ii) Reações envolvendo os aluminatos.

(i) Reações envolvendo os silicatos (C_3S e C_2S)

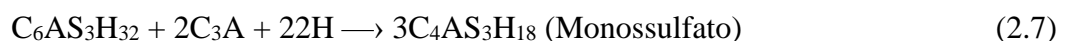
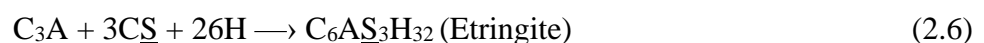
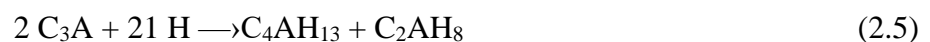
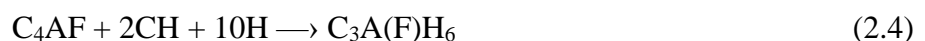
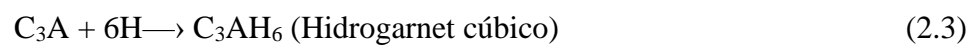
São reações de hidratação dos silicatos representadas pelas Equações 2.1 e 2.2. Estas influenciam as características da resistência mecânica do betão. Os produtos principais de hidratação formados são os Silicatos de Cálcio Hidratados, $C_3S_2H_3$ ou C-S-H e o hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$ ou CH.



As reações 2.1 e 2.2 são perfeitamente equilibradas estequiometricamente. No entanto, C-S-H não possui uma estequiometria bem definida podendo a relação C/S de C-S-H variar entre 1,5 e 2 sendo geralmente 1,8. C-S-H não tem uma estrutura definida, sendo por isso denominado como um gel. A principal diferença na hidratação dos dois silicatos está na quantidade de CH formado na reação. Como é visível nas reações 2.1 e 2.2 é produzido 3 vezes mais CH a partir da hidratação de C_3S do que da hidratação de C_2S .

(ii) Reações envolvendo os aluminatos (C_3A e C_4AF)

São reações de hidratação dos aluminatos representadas pelas Equações 2.3 a 2.7. A velocidade de hidratação destas reações é superior à dos silicatos. Determinam a perda de consistência (enrijecimento) e a pega (solidificação) do betão. Os produtos principais de hidratação formados são hidratos cristalinos (Hidrogarnet cúbico, C_3AH_6 ; C_4AH_{13} e C_2AH_8); Etringite ou sulfoaluminato de cálcio ou AF_t , $C_6AS_3H_{32}$ e monossulfato ou AF_m , $3C_4AS_3H_{18}$.



C_2AH_8 é uma fase metaestável que se deposita como plaquetas hexagonais (semelhantes a CH) e acima de $30^\circ C$ converte-se em hidrogarnet cúbico (C_3AH_6). A Etringite é depositada como cristais hexagonais aciculares e colunares. A presença de canais tubulares entre as colunas pode

levar a alta absorção de água e inchaço pela etringite, sendo esta uma das teorias que explicam a expansão causada pela formação de etringite.

Quase todos os iões SO_4^{2-} se combinam para formar a etringite no CPN. Se ainda existir C_3A depois desta reação, este pode-se combinar com a etringite para formar monossulfato (ou AF_m). Se existir um excesso suficiente de C_3A , pode se formar um outro produto de hidratação, C_4AH_{13} , este pode existir numa solução sólida com AF_m .

C_4AF produz produtos de hidratação similares aos produzidos por C_3A , onde os iões Al^{3+} são substituídos parcialmente por iões Fe^{3+} . Quanto maior for a relação $\text{C}_4\text{AF}/\text{C}_3\text{A}$, menor será a conversão de etringite em monossulfato.

A reação de hidratação do cimento é exotérmica, ou seja, ocorre libertação de calor. Na Figura 2.1 representa-se uma evolução típica do calor durante a hidratação do Cimento Portland.

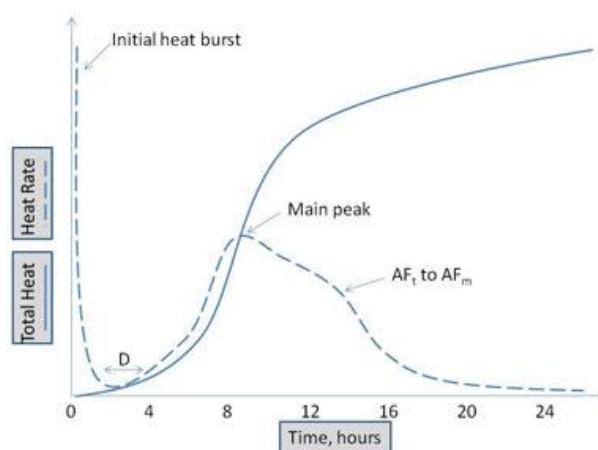


Figura 2.1 – Evolução típica de calor durante a hidratação do Cimento Portland (The Concrete Portal@, 2017).

Pela Figura 2.1 identificam-se três picos característicos, (i) explosão inicial de calor; (ii) pico principal e (iii) pico mais amplo.

A explosão inicial de calor (i) corresponde à alta taxa instantânea de calor desenvolvida pelo contacto entre o cimento e água. Tal é devido ao calor de molhagem, dado pela diferença entre a energia superficial e a energia necessária para a criação de interface. Existe ainda uma contribuição resultante da hidratação de C_3S e C_3A . À explosão inicial de calor segue-se uma diminuição da taxa de evolução de calor. No entanto esta taxa nunca se torna negativa ou se anula, pelo que as reações continuam a ocorrer lentamente. Este período é denominado como o

período de indução ou dormente. Este período dormente é seguido pelo pico principal de hidratação do cimento (ii), associado à rápida dissolução de C_3S formando C-S-H e CH, existindo também formação de etringite a partir de C_3A . De seguida dá-se uma nova diminuição da taxa de evolução de calor. Finalmente a existência do pico mais amplo (iii) está associada à conversão de etringite em monossulfato.

A hidratação do cimento é por isso composta por quatro fases, a) Período de Pré-Indução; b) Período de Indução, ou dormente; c) Fase de aceleração e d) Período pós-aceleração.

a) Período de Pré-Indução

Decorre durante os primeiros minutos após o início da mistura. Ocorre uma rápida dissolução de espécies iónicas, com sulfatos alcalinos a contribuírem com iões K^+ , Na^+ e SO_4^{2-} e $CaSO_4$ a contribuir com iões Ca^{2+} e SO_4^{2-} . O aluminato tricálcico (C_3A) começa a dissolver-se e reage com os iões SO_4^{2-} , C_4AF também reage, ambos formando etringite (AF_t). Apenas uma pequena percentagem de belite (C_2S) reage nesta fase. Dá-se ainda uma formação de C-S-H na superfície de dissolução da alite (C_3S). Uma vez que a relação de C/S de C-S-H é inferior à de C_3S ocorre um aumento da concentração de iões Ca^{2+} na fase líquida. Como resultado forma-se uma dupla camada elétrica que juntamente com a precipitação de CH conduzem ao período dormente.

b) Período de Indução (ou dormente)

Prolonga-se durante as primeiras horas após o início da mistura. A concentração de CH na fase líquida atinge um valor máximo e começa a diminuir. A concentração de iões SO_4^{2+} mantém-se relativamente constante uma vez que a quantidade consumida pela formação de etringite é equilibrada pela quantidade dissolvida do gesso.

Várias teorias foram propostas para a existência deste período dormente. Como foi referido anteriormente, a taxa de evolução do calor durante esta fase é baixa. A desaceleração do processo de hidratação foi explicada usando as seguintes ideias:

- (i) A formação de uma camada de hidrato impermeável (C-S-H) na superfície das partículas de C_3S impede a sua dissolução adicional;
- (ii) A camada de hidrato tem uma menor relação C/S do que C_3S . Como resultado os iões Ca^{2+} são libertados para a fase líquida (que contém iões OH^-) e uma camada rica em sílica forma-se na superfície das partículas de C_3S . Esta dupla

camada elétrica impede qualquer reação de formação de C-S-H ao impedir a passagem de iões;

- (iii) A fase líquida fica supersaturada com CH. Este começa a precipitar, o que leva à interrupção da dissolução adicional de C_3S .

Considera-se que o final do período dormente pode ocorrer de várias maneiras: enfraquecimento da barreira devido ao envelhecimento; difusão de iões pode ocorrer através da barreira por osmose; enfraquecimento gradual da dupla camada elétrica; a nucleação de CH pode ser retardada quando os núcleos se começam a aproximar do seu tamanho crítico.

c) Fase de Aceleração

Normalmente definida pelas 3-12 horas após o início da mistura. Dá-se uma nucleação e desenvolvimento de C-S-H, muitas vezes denominado como “C-S-H” de segunda fase e uma ocorrência de CH. A belite (C_2S) começa a hidratar-se substancialmente.

Devido à precipitação de $Ca(OH)_2$ a concentração de iões Ca^{2+} em fase líquida começa a diminuir, assim como a concentração dos iões SO_4^{2-} , devido à formação de etringite e a adsorção destes iões em C-S-H.

d) Período Pós-Aceleração

Esta fase é definida pela desaceleração do processo devido ao declínio do material que ainda não reagiu e porque o processo passa a ser controlado por difusão. A contribuição de C_2S vai aumentando constantemente e uma vez que a sua hidratação forma três vezes menos CH do que a hidratação de C_3S origina-se uma diminuição na taxa de formação de CH. O consumo de iões SO_4^{2-} leva a uma conversão de etringite em monossulfato.

Na Figura 2.2 é apresentado um progresso típico da hidratação do cimento.

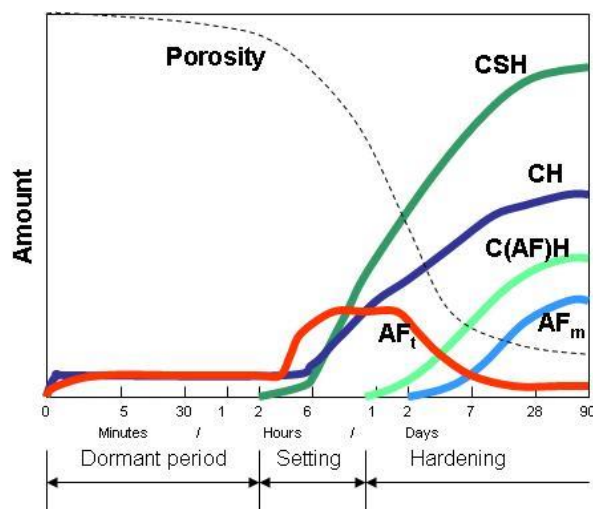


Figura 2.2 – Progresso da Hidratação do Cimento (The Concrete Portal@, 2017).

Nos primeiros minutos, cerca de 2-10% da alite (C_3S) é hidratada, sendo consumida uma fração significativa nos primeiros 28 dias. A sua taxa de hidratação depende da sua reatividade, isto é, da quantidade de “íons estranhos” presentes na estrutura da alite. Um aumento na quantidade de SO_3 resulta numa reação mais rápida, no entanto para uma quantidade limite esta será retardada.

A hidratação da belite (C_2S) é um processo lento demorando horas a aumentar de ritmo.

Por outro lado, cerca de 5-25% do Aluminato tricálcico (C_3A) reage nos primeiros minutos da hidratação. A sua reatividade inicial depende da quantidade e qualidade dos alcalinos presentes. Íons K^+ aumentam a reatividade, mas os íons Na^+ diminuem-na.

A reatividade do ferro aluminato de cálcio (C_4AF) depende da relação A/F do cimento.

2.3 Propriedades mecânicas e térmicas do betão

2.3.1 Influência dos materiais constituintes da mistura

Tal como no ponto 2.2, o conteúdo deste ponto é composto por conteúdos retirados das referências bibliográficas Neville (2004) e The Concrete Portal@ (2017).

A relação água/cimento é um dos fatores mais importantes que regem a resistência do betão. Valores altos desta relação implicam uma maior porosidade que por sua vez implica uma menor resistência.

Na Figura 2.3 representa-se uma relação entre a resistência à compressão do betão e a relação água/cimento que se verifica na maioria dos betões. Esta relação pode ser generalizada através da Lei de Abram, que estipula que a resistência à compressão do betão é inversamente proporcional à relação água/cimento. Onde A e B são constantes e a relação água/cimento varia entre 0,30 e 1,20.

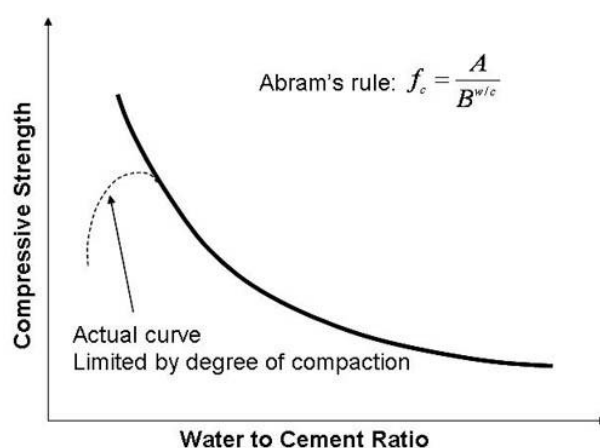


Figura 2.3 – Relação entre o rácio água/cimento e a resistência à compressão do betão (The Concrete Portal@, 2017).

Em teoria, a resistência à compressão do betão deveria continuar a aumentar com a diminuição da relação água/cimento. No entanto este aumento tem um limite. Isto porque valores muito baixos da relação água/cimento levam a uma compactação não adequada, o que leva a uma queda na resistência à compressão do betão, como se verifica na Figura 2.3.

Como foi referido atrás, a porosidade desempenha um papel determinante na resistência à compressão do betão. Outro fator importante é o rácio “gel-space” que indica a concentração de produtos de hidratação sólidos no seu espaço disponível na pasta de cimento. Este rácio é definido como a relação entre o volume da pasta de cimento hidratada e a soma dos volumes do cimento hidratado e dos poros capilares. A relação deste rácio com a resistência à compressão do betão encontra-se indicada na Figura 2.4, onde se observa que a resistência do betão é proporcional ao cubo do valor do rácio “gel-space”.

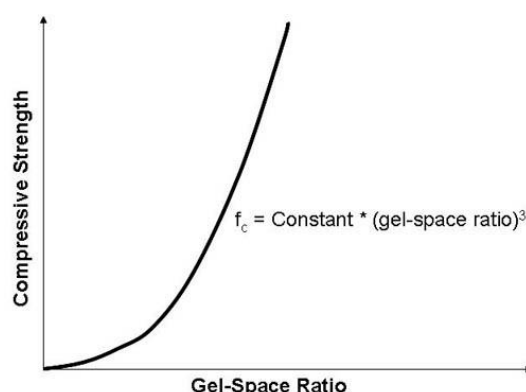


Figura 2.4 – Relação entre o rácio “gel-space” e a resistência à compressão do betão (The Concrete Portal@, 2017).

A relação entre a quantidade de cimento e a resistência à compressão do betão não é tão simples. Para uma relação água/cimento constante, a resistência à compressão primeiro aumenta e depois diminui. Isto deve-se ao facto de que para quantidades de cimento altas, correspondem quantidades de água altas. De qualquer forma, o uso crescente de aditivos minerais (como cinzas volantes, “sílica fumes”, “ground granulated blast furnace slag”, etc) tem feito diminuir o uso de betões com grandes quantidades de cimento.

Além dos fatores acima referidos, relacionados com a pasta de cimento, existem outros fatores que influenciam a resistência do betão. Como as propriedades dos agregados grossos e a relação agregados/cimento. A tensão a que as fendas se desenvolvem depende em grande parte das propriedades dos agregados grossos, onde agregados como o cascalho liso conduzem a fendas para tensões mais baixas do que em britas ásperas e angulosas. Isto porque a ligação mecânica é influenciada pelas propriedades da superfície e até certo ponto, pela forma dos agregados grossos.

A relação agregados/cimento tem um efeito marginal, ou secundário, na resistência do betão. Para uma relação água/cimento constante, misturas com mais agregados conduzem a uma resistência superior. As razões para este comportamento não são claras. Em certos casos alguma água pode ser absorvida pelos agregados, reduzindo a relação água/cimento efetiva. Noutros casos, um conteúdo superior de agregados origina uma menor retração e exsudação, logo os danos à ligação entre o agregado e a pasta de cimento seriam inferiores. Adicionalmente as mudanças térmicas provocadas pelo aquecimento devido à hidratação do cimento também seriam menores. No entanto a explicação mais provável, está no fato de que o conteúdo total de água por metro cúbico de betão será inferior para misturas com uma maior relação

agregados/cimento. Como resultado essas misturas formaram um menor volume de vazios e são estes vazios que têm um efeito adverso na resistência do betão.

2.3.2 Influência da temperatura de cura

A cura a altas temperaturas promove a aceleração da hidratação do cimento, levando à formação de uma maior quantidade de produtos de hidratação, nomeadamente C-S-H, nas fases iniciais da hidratação do que numa cura à temperatura ambiente. Sendo estes produtos de hidratação responsáveis pela resistência do betão os investigadores reiteravam que a resistência a curto prazo seria superior que a cura a temperatura ambiente. No entanto esta rápida formação leva a uma distribuição heterogénea dos produtos de hidratação. Adicionalmente, C-S-H em CPN assume uma estrutura mais densa, passando de uma densidade aparente de $2,03 \text{ kg/m}^3$ a 20°C para $2,27 \text{ kg/m}^3$ a 60°C , cerca de 12% superior. Produtos de hidratação mais densos e com uma distribuição mais heterogénea formam uma microestrutura dos poros no betão mais porosa durante a cura. Tal resulta numa diminuição da resistência a longo prazo (Zhao et al, 2015; Xue et al, 2015; Nie et al, 2016; Nasir et al, 2017; Pichler et al, 2017; Wang e Park, 2017; Xu et al, 2017 e Haque et al, 2018).

Longo (2016) estudou a evolução da temperatura em provetes de betão numa estufa onde recriou as condições de fronteira de um maciço infinito. Para o efeito construiu moldes de $200*200*200\text{mm}$ utilizando placas de aglomerado de madeira revestido a melamina branca. Utilizou placas de espuma rígida de poliestireno extrudido de a modo a isolar termicamente o molde. Por último utilizou uma mistura composta pelo cimento *CEM II/A-L 42,5R* e a mesma areia e água utilizadas na presente dissertação, disponíveis no LEMEC. Essa mistura, de traço 1:2,5:0,53, foi colocada nos moldes e vibrada durante 30 segundos, dando origem a *Pan20141104* e *Pan20141106*. O autor verificou aumentos de temperatura de cerca de 63°C entre o início e o fim do ensaio como pode ser observado na Figura 2.5.

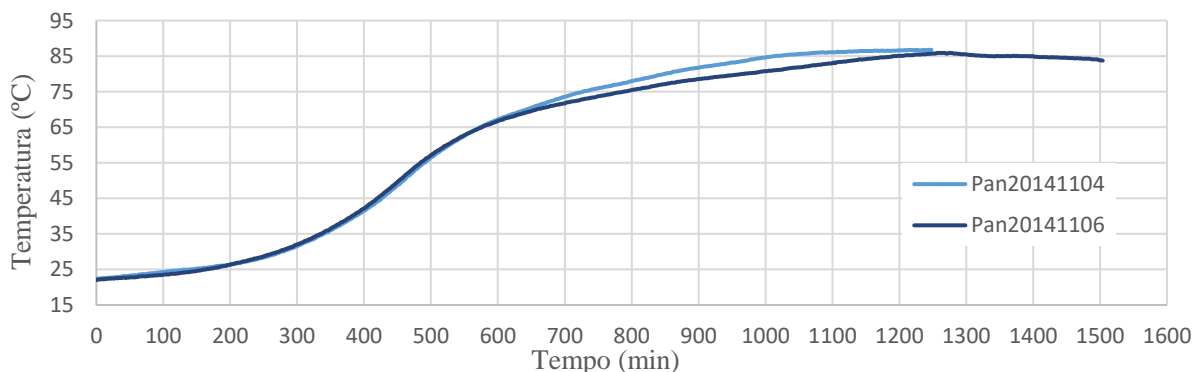


Figura 2.5 – Evolução da Temperatura no Provette. Misturas Pan20141104 e Pan20141106 (Longo, 2016).

Estes gradientes de temperatura levantam alguma preocupação à resistência de grandes maciços de betão, como por exemplo barragens e pontes. De seguida são apresentados alguns estudos que relacionam propriedades mecânicas do betão com a temperatura de cura. Estes apresentam algumas diferenças nos resultados apresentados, assim como técnicas e materiais utilizados.

Num estudo, Kim et al (2002) utilizaram um cimento, designado por *Type I cement*, cuja composição se indica na Tabela 2.1. Tendo uma resistência à compressão aos 28 dias de idade de referência de 40MPa. Os agregados utilizados foram uma areia de módulo de finura 2,95, peso específico 2,55 e uma brita granítica com um diâmetro máximo de 19mm, módulo de finura 7,23, peso específico de 2,58. Foram também utilizados dois aditivos, um agente “air-entraining” (AE) e um superplastificante.

Tabela 2.1 – Composição do *Type I cement* (Kim et al, 2002).

Componente	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O
(%)	63,03	20,57	5,48	3,41	3,18	2,23	0,80

A mistura foi realizada para uma quantidade de cimento de 452 kg/m³; relação água/cimento de 0,40; relação areia/brita de 0,39 e 0,5% e 0,005% massa de cimento para o superplastificante e agente AE respetivamente. O material resultante foi colocado em moldes de papel 100*200mm. Entre a execução da mistura e a colocação dos moldes em estufas decorreram cerca de 30min. As estufas foram programadas para temperaturas de cura de 10, 23, 35 e 50°C. Após 24h de cura os moldes de papel foram removidos. Os provetes foram curados nas estufas até às idades de ensaio de 1, 3, 7 e 28 dias. Na Figura 2.6 representam-se os resultados experimentais da tensão de compressão obtidos por Kim et al (2002).

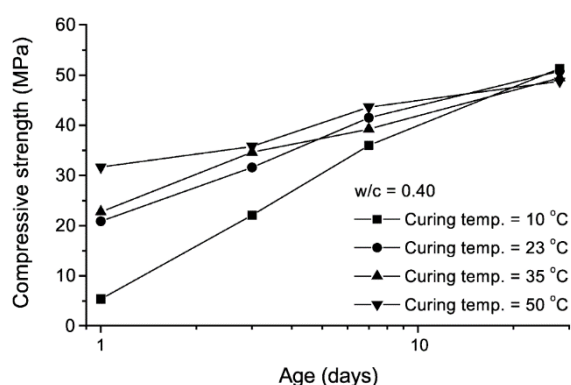


Figura 2.6 – Resultados experimentais da tensão de compressão (Kim et al, 2002).

Kim et al (2002) observaram um aumento da tensão de compressão resistente aos 1 e 3 dias de idade para um aumento da temperatura de cura. No entanto esta tendência reverte-se com a idade. A tensão de compressão aos 28 dias assume o maior e menor valor registado para uma temperatura de cura de 10°C e 50°C respetivamente. Pelo que concluíram que o betão sujeito a altas temperaturas numa fase inicial atinge tensões resistentes superiores em idades iniciais, no entanto atinge uma resistência reduzida a longo prazo.

Noutro estudo, Fan et al (2017), utilizaram um Cimento Portland Normal (CPN), com uma resistência à compressão de referência de 42,5MPa aos 28 dias de idade e composição química indicada na Tabela 2.2. Como agregados utilizaram uma areia de modulo de finura de 2,6, uma cerâmica de cascalho/xisto com diâmetros na gama de 5-15mm e uma densidade aparente de 710 kg/m³. Foi ainda utilizado um aditivo, um superplastificante, como agente de redução de água.

Tabela 2.2 – Composição do cimento (Fan et al, 2017).

Componente	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
(%)	57.9	23.7	7.4	2,04	1,9	2,64	0,63	0,31

O material obtido da mistura foi colocado em provetes de 200*200*100mm. Estes foram curados às temperaturas de 20, 40 e 60°C. Na Figura 2.7 representam-se as curvas ajustadas entre a resistência à compressão e a idade de cura em diferentes temperaturas obtidas por Fan et al (2017).

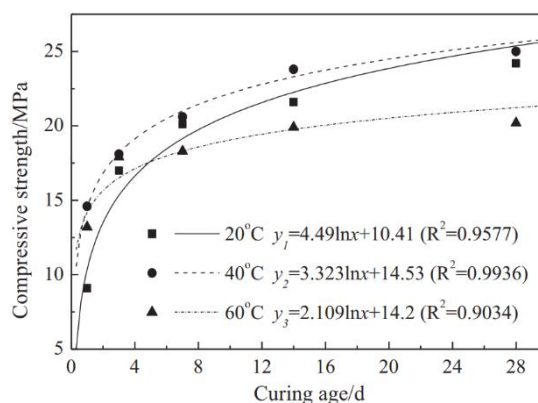


Figura 2.7 – Curvas ajustadas entre a resistência à compressão e a idade de cura em diferentes temperaturas (Fan et al, 2017).

Da Figura 2.7 é visível que numa fase inicial, a tensão resistente de compressão menor correspondeu à temperatura de cura inferior de 20°C. A temperatura de 40°C registou a maior tensão de compressão resistente durante todo a cura, sugerindo que 40°C seja uma temperatura de cura ideal para uma maior resistência a curto e longo prazo. Por último a longo prazo, a cura a 20 e 40°C exibem valores semelhantes, existindo, no entanto, uma redução significativa de resistência na cura a 60°C. Redução essa de 20% aproximadamente.

Num último estudo, elaborado por Wang et al (2017), foram estudadas algumas propriedades de pastas de cimento de sulfatoaluminato de cálcio (CSA) formado misturando clínquer de CSA e Anidrita, cujas composições se indicam na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Composição do clínquer de CSA e da Anidrita em % (Wang et al, 2017).

Componente	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O
CSA clínquer	0,09	1,69	33,36	8,28	0,14	7,90	0,11	0,23
Anidrita	0,04	3,00	0,12	1,40	-	50,10	0,02	0,05
Componente	CaO	TiO ₂	Gr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	WO ₃	MnO
CSA clínquer	43,00	1,35	0,02	1,95	0,07	0,05	-	0,02
Anidrita	44,80	-	-	0,04	0,44	-	-	-

A pasta de cimento CSA foi obtida para uma relação de massas de 1/0,12 entre o clínquer de CSA e a Anidrita. Resultando num cimento com uma densidade de 2,84 g/cm³. As pastas foram preparadas a 20°C para uma relação de água/cimento de 0,40. Estas foram misturadas numa primeira fase a uma velocidade baixa durante 30seg. Após um tempo de espera de 15seg, foram misturadas numa segunda fase a uma velocidade superior durante 30seg. Subsequentemente foram envolvidas por um plástico e colocadas em recipientes selados a temperaturas de 0, 5, 20, 40 e 80°C.

Na Figura 2.8 representam-se os resultados da resistência à compressão de pastas de cimento CSA curadas a várias temperaturas aos 1, 3, 7 e 28 dias obtidos por Wang et al (2017).

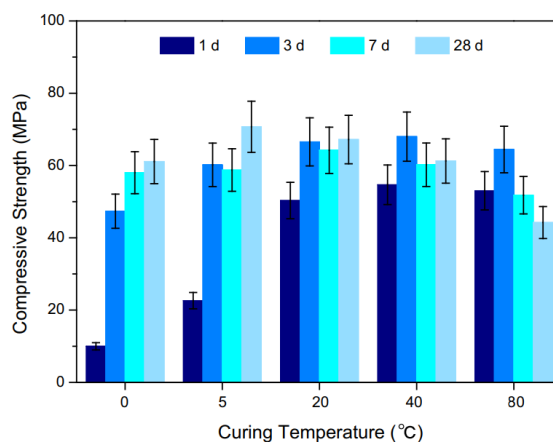


Figura 2.8 – Resistência à compressão de pastas de cimento CSA curadas a várias temperaturas aos 1, 3, 7 e 28 dias (Wang et al, 2017).

Focando a análise para os resultados obtidos para as temperaturas de cura de 20, 40 e 80°C aos 1 e 28 dias de idade. Observa-se que a tensão resistente à compressão nas temperaturas de 40 e 80°C são similares, sendo superiores à registada a 20°C. A maior resistência, a 1 dia de idade, corresponde à temperatura de cura de 40°C. Para os 28 dias, a tensão resistente à compressão diminui com o aumento da temperatura de cura. Uma comparação entre as temperaturas de 20 e 80°C sugere uma redução de 30% aproximadamente.

Os resultados obtidos por estes autores sugerem, portanto que o aumento da temperatura de cura influencia de forma negativa a resistência a longo prazo, podendo, no entanto, contribuir para uma maior resistência a curto prazo.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será feita uma descrição do procedimento experimental realizado no decorrer do trabalho laboratorial. Serão indicados os materiais, equipamentos e metodologias utilizadas para determinar a influência da temperatura de cura na resistência à compressão do betão.

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado nas misturas foi o cimento Portland de calcário fornecido pela empresa Cimpor, cuja designação comercial é CEM II/B-L 32,5N; trata-se de um cimento vulgar nas obras de construção civil. De acordo com a ficha técnica disponibilizada pela Cimpor (2017), a sua boa trabalhabilidade e baixo calor de hidratação tornam-no especialmente adaptado a todos os trabalhos correntes da construção. Apresenta um valor de referência da resistência mecânica à compressão de 16 MPa aos 7 dias e 32,5 MPa aos 28 dias. Para a massa volúmica do cimento considerou-se o valor $\gamma_{cimento} = 2900 \text{ kg/m}^3$.

3.2.2 Areia

A areia utilizada nas misturas é uma areia natural rolada, proveniente das obras realizadas na autoestrada que liga Coimbra à Figueira da Foz junto ao nó com a A1. A composição elementar e a granulometria da areia são apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2 respetivamente. Embora corresponda a um agregado com diâmetros inferiores a 2mm, trata-se de uma areia com poucos finos, tal como se mostrará adiante. Para a massa volúmica da areia considerou-se o valor $\gamma_{areia} = 2650 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 3.1 – Composição elementar da areia.

Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	CaO	Cl
%	85,16	6,67	4,79	1,51	0,46	0,37	0,33	0,31	0,26	0,06

Tabela 3.2 – Granulometria da areia.

Diâmetro Peneiros (mm)	2	0,85	0,425	0,25	0,106	0,075	0,059	
% Passados	100	64,17	32,13	11,99	4,70	3,81	3,07	
Diâmetro Peneiros (mm)	0,042	0,027	0,015	0,011	0,008	0,003	0,002	0,001
% Passados	2,37	1,68	1,68	1,68	1,68	1,61	1,61	1,40

3.2.3 Brita calcária

A brita utilizada nas misturas é uma brita calcária de tons brancos e bege, estrutura compacta e textura angular. A granulometria da brita apresenta-se na Tabela 3.3. Trata-se essencialmente de uma brita com diâmetros em torno de 10mm, Brita 1, portanto. Para a massa volúmica da brita considerou-se o valor de $\gamma_{brita} = 2850 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 3.3 – Granulometria da brita.

Diâmetro Peneiros (mm)	12,5	9,5	6,3	4,75	2
% Passados	88,86	48,58	6,60	1,28	0,00

3.2.4 Água

A água utilizada para desencadear as reações de hidratação do cimento das misturas efetuadas foi obtida da rede doméstica de abastecimento público ao Laboratório de Estruturas, Mecânica Estrutural e Construções (LEMEC) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (FCTUC). Para a massa volúmica da água considerou-se o valor de $\gamma_{água} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

3.2.5 Aditivo

Na última mistura realizada, Mistura 6, foi utilizado um aditivo, designado comercialmente por Sika® ViscoCrete®-3005 sendo um superplastificante forte redutor de água para betão. Permite obter uma forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, bem como um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas. Segundo a ficha técnica do produto, em betões quase sem vibração, recomenda-se uma dosagem de 1% a 1,4% do peso do cimento,

tendo-se utilizado 1,2%. Quanto à massa volúmica é dado como referência um valor de 1,05 ($\pm 0,02$) kg/dm^3 .

3.3 Principais Equipamentos

3.3.1 Estufa

Para simular a cura dos provetes interiores num maciço infinito foi utilizada uma estufa elétrica, de dimensões interiores $58*98*80\text{cm}^3$, indicada na Figura 3.1. Durante os ensaios, esta estufa foi operada de modo a gerar uma temperatura interior necessária à simulação pretendida; maciço infinito. Nesta estufa eram colocados 13 provetes distribuídos por 3 prateleiras. Este número estava limitado pela capacidade calorífica e tamanho da estufa, tal como se explica adiante.



Figura 3.1 – Estufa.

3.3.2 Data logger

Para efetuar o registo das temperaturas observadas ao longo do ensaio utilizou-se um Data logger, modelo TML Portable Data Logger TDS-601 de 10 canais, indicado na Figura 3.2. Este modelo não dispõe de memória interna pelo que foram utilizadas disquetes. Devido á limitada capacidade das disquetes o intervalo de tempo entre leituras escolhido foi de 30seg.

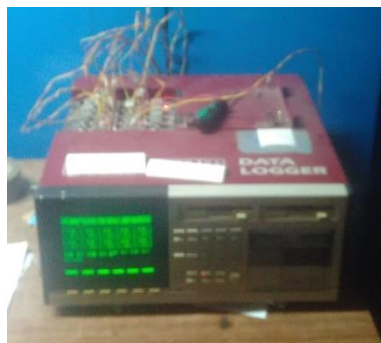


Figura 3.2 – Data logger.

3.3.3 Termopares

Para a medição das temperaturas, em cada instante, utilizaram-se 10 termopares do tipo K, de uso genérico e baixo custo, capazes de cobrir temperaturas entre os -200°C e 1200°C .

3.3.4 Misturadora

Na realização das misturas propriamente ditas foi utilizada uma misturadora de eixo vertical com capacidade para cerca de 180L que estava disponível no LEMEC.

3.3.5 Mesa vibratória

Após colocação da mistura nos moldes procedeu-se imediatamente à compactação. Para a vibração dos moldes utilizou-se a mesa vibratória indicada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Mesa vibratória.

3.3.6 Prensa hidráulica

Para determinar a tensão resistente à compressão os provetes foram ensaiados numa prensa eletromecânica de 500ton controlando a deformação.

3.4 Preparação das Misturas

3.4.1 Aspetos Comuns

O objetivo desta dissertação consistiu em avaliar a evolução da resistência mecânica no betão se curado num maciço infinito, de modo a determinar qual a influência da temperatura de cura. Uma forma de avaliar essa resistência é através da tensão resistente à compressão de cubos. No presente trabalho foram construídos cubos de 150mm de lado. Os provetes cúbicos foram divididos em dois grupos. O primeiro grupo, designado por provetes exteriores, foi executado através de moldes de PVC e colocado em condições ambientais durante todo o ensaio. O segundo grupo, designado por provetes interiores, foi executado utilizando moldes de ferro fundido e colocado numa estufa elétrica de modo a simular as condições de fronteira de um maciço infinito. Este ensaio teve uma duração aproximada de dois dias. Para as duas primeiras misturas apenas se utilizaram 6 moldes de PVC. Posteriormente, para se poder avaliar a tensão em mais datas passou-se a utilizar 10 moldes de PVC. Para o número de moldes interiores teve-se em conta as dimensões da estufa e o trabalho desenvolvido anteriormente por Longo (2016) relativamente à capacidade da estufa de gerar gradientes de temperatura suficientes para que fosse possível simular as condições de fronteira de um maciço infinito. Conclui-se que se deveria limitar o número de moldes colocados no interior da estufa a 13 unidades.

Foram realizadas 6 misturas tendo-se mantido a mesma quantidade de cimento, cerca de 567kg/m^3 . Foi introduzida brita nas misturas finais e adicionalmente um aditivo na última mistura.

A composição das misturas foi obtida recorrendo à fórmula fundamental da composição do betão apresentada na Equação 3.1 onde se considera que uma unidade de volume de betão é igual à soma do volume efetivo de agregados V_a , do volume de água V_w , do volume efetivo de cimento V_c e do volume de vazios V_v .

$$1 = V_a + V_w + V_c + V_v \quad (3.1)$$

Sabendo que o volume efetivo é igual ao quociente entre a massa M e a massa volúmica γ , a Equação 3.1 pode ser alterada de modo a que seja possível calcular as quantidades necessárias de cada componente para um determinado volume de betão V_b resultando assim na Equação 3.2.

$$V_b = \left[\frac{M_{\text{areia}}}{\gamma_{\text{areia}}} + \frac{M_{\text{brita}}}{\gamma_{\text{brita}}} \right] + \frac{M_{\text{água}}}{\gamma_{\text{água}}} + \frac{M_{\text{cimento}}}{\gamma_{\text{cimento}}} + V_v \quad (3.2)$$

Conhecidas as quantidades necessárias dos materiais, a pesagem dos agregados e da água era realizada nos dias anteriores à realização da mistura enquanto que o cimento era pesado no dia. Para esta pesagem utilizou-se uma balança do LEMEC, com uma capacidade de 100kg e uma precisão de 0,05kg. Também nos dias anteriores eram colocados 4 termopares naquele que seria o provete de controlo, sendo colocados 2 no centro de duas faces opostas, 1 num canto superior de uma dessas faces e 1 num canto inferior da outra face. Na tampa desse mesmo molde, eram ainda colocados 2 termopares com o objetivo de ficarem colocados no centro da mistura do cubo, tal como é visível na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Colocação dos termopares no provete e molde de controlo.

Na realização da mistura começava-se por colocar parte da areia na misturadora de modo a diminuir o pó provocado pela natureza fina das partículas do cimento adicionado de seguida; após a colocação de todo o cimento, seguia-se o resto da areia. Colocados o cimento e a areia na misturadora procedia-se então à adição da água. No caso de as misturas conterem brita, esta era colocada após o descrito anteriormente. Na última mistura, o superplastificante foi previamente diluído numa pequena parcela da água da mistura, a qual foi adicionada depois da restante água. Depois de enchidos os moldes, estes eram vibrados durante cerca de 20seg, de

modo a expulsar eventuais bolsas de ar na mistura. Importa referir que este procedimento era realizado em primeiro lugar para os provetes interiores, devido à necessidade de começar o ensaio o mais depressa possível. Depois de vibrados todos os provetes interiores, era colocado 1 termopar em cada uma das prateleiras da estufa e por fim fechava-se a estufa com os 13 moldes colocados no seu interior. Adicionalmente, colocava-se o décimo e último termopar no exterior da estufa para registar a temperatura ambiente. Por último eram enchidos e vibrados os moldes de PVC, sendo colocados em condições ambientais do laboratório e cobertos por uma película de plástico.

De maneira a recriar as condições de fronteira de um maciço infinito, ou seja, de um ensaio adiabático, as temperaturas na fronteira interna do molde e do centro do provete de controlo teriam que ser o mais próximas possível, de modo a evitar perdas e/ou ganhos de energia que perturbariam a normal evolução da temperatura no provete. A metodologia que permitiu perspetivar a evolução da temperatura na fronteira do molde não foi fácil de ser implementada. Esta metodologia dependia de três barreiras a transpor. Em primeiro lugar, era necessário conhecer o funcionamento da estufa. Tendo como base a metodologia de Longo (2016), e após alguns testes, elaborou-se uma folha de cálculo Excel que permitia relacionar o tempo que a resistência da estufa deveria estar ligada, num dado intervalo de tempo, de modo a estabelecer uma dada temperatura no interior da estufa. Em segundo lugar era necessário que esta temperatura interior permitisse que a temperatura do molde acompanhasse a temperatura do provete. Também neste ponto em particular, após alguma pesquisa, foi possível relacionar o efeito com a causa. Em terceiro lugar, a tarefa mais difícil: conhecer a temperatura de evolução do provete. Neste caso, restou a experiência adquirida. No trabalho desenvolvido por Longo (2016), a estufa era operada em intervalos regulares de 10min. No entanto, observava-se que a temperatura do provete poderia começar a descer nesse intervalo, tendo depois que ser corrigido no intervalo seguinte. Numa tentativa de reduzir esse efeito, decidiu-se operar a estufa em intervalos regulares de 5min.

Importa referir que existia uma dificuldade acrescida relativamente a esta metodologia, isto é, o tempo que se ligava a resistência da estufa não produzia um impacto imediato na temperatura interior da estufa, e adicionalmente, esta temperatura interior da estufa também não produzia um impacto imediato na temperatura da fronteira do molde. Para além disso, os efeitos destes impactos diferiam conforme se mudasse bruscamente o tempo que a estufa estivesse ligada. Por exemplo, a passagem de 180seg/5min para 60seg/5min produziria efeitos durante um maior intervalo de tempo do que se fizesse uma mudança de 60seg/5min para 50seg/5min. Em geral os efeitos produzidos devido a ligar a estufa só começariam a ser perceptíveis no molde após 5 a 10min, propagando-se por mais 15 a 20min. Em resumo, para esta metodologia existia a

necessidade de prever qual a temperatura do provete 25 a 30min depois, para que se pudesse operar a estufa de modo a que o molde acompanhasse o provete.

Por fim, deixava-se de operar a estufa quando a evolução da temperatura do provete de controlo assumia valores da ordem de $0,1^{\circ}\text{C}/10\text{min}$, durante várias horas. Neste contexto, considerava-se que a cura em condições adiabáticas tinha gerado todas as consequências em termos de resistência. Em geral, ao fim de 40 a 45h, terminava-se o ensaio.

Após a cura os provetes eram descofrados e eram realizados ensaios de compressão para a determinação da tensão resistente à compressão dos provetes cúbicos. Estes ensaios foram realizados segundo a norma NPEN 12390-3. Para o efeito utilizou-se uma prensa eletromecânica de 500ton. O ensaio foi realizado por controlo de deformação, aplicando uma deformação à taxa de $0,01\text{mm/s}$ até ser atingida a rotura nos provetes.

3.4.2 Misturas

A Mistura 1 foi realizada numa quinta-feira, dia 30 de março de 2017. Foram construídos 19 provetes, em que 13 foram curados em moldes de ferro fundido no interior da estufa e 6 foram curados em moldes de PVC e curados à temperatura ambiente do laboratório. Foram colocados em primeiro lugar o cimento e a areia na misturadora de acordo com o referido anterior tendo-se adicionado água por volta das 10h e registado as primeiras temperaturas 40min depois. As quantidades da Mistura 1, indicadas na Tabela 3.5, foram calculadas segundo as Equações 3.1 e 3.2 para o número de provetes indicado e para um traço de cimento: areia: água de 1:2,5:0,5 sendo este o traço utilizado por Longo (2016). Durante a realização da mistura observou-se um excesso de fluidez pelo que se reduziu a relação água/cimento para as misturas seguintes. Em relação a esta mistura, tendo em conta ser a primeira, importa referir que se perderam dois provetes interiores devido a um incorreto uso da prensa aquando a realização dos ensaios. Nesta mistura não se ligou a estufa.

A Mistura 2 foi realizada numa quinta-feira, dia 6 de abril de 2017. O número de provetes construídos foi idêntico ao da mistura anterior bem como a sua distribuição relativamente à cura no interior e exterior da estufa. As quantidades de materiais, indicadas na Tabela 3.5, foram calculadas tal como na mistura anterior, tendo-se reduzido a relação de água/cimento para 0,47 devido ao excesso de fluidez observado anteriormente. Esta redução revelou-se eficaz pelo que foi mantida para as Misturas 3 e 4. O intervalo de tempo Δt entre a adição da água à mistura e o fecho da estufa foi de 30min, tratando-se de uma melhoria na execução da mistura. A Mistura

2 difere ainda da mistura anterior em relação à cura interior, tendo como objetivo recriar as condições de fronteira de um maciço infinito.

A Mistura 3 foi realizada numa quinta-feira, dia 20 de abril de 2017. Nesta mistura pretendia-se confirmar os valores registados da temperatura do provete na mistura anterior e aumentar o número de dias de ensaio dos provetes exteriores. Para o efeito construíram-se 4 provetes adicionais, isto é, construiu-se um total de 23 provetes cúbicos, em que 13 seriam curados no interior da estufa e 10 no exterior. Nesta mistura conseguiu-se diminuir ainda mais o tempo de execução da mistura passando para 25min entre a adição da água e o fecho da estufa. Verificou-se, no entanto, que a temperatura do provete não teve uma evolução conforme o esperado, mais tarde descobriu-se que os termopares colocados para medir a temperatura no centro do provete se tinham deslocado da posição pretendida.

A Mistura 4 foi realizada numa quinta-feira, dia 4 de maio de 2017. Devido ao erro detetado na mistura anterior decidiu-se realizar uma nova mistura. Assim, a Mistura 4 é idêntica à mistura anterior. Até ao fecho da estufa existiu um intervalo de tempo $\Delta t = 40\text{min}$. As quantidades utilizadas estão indicadas na Tabela 3.5. No final da cura a temperatura do provete chegou a valores similares aos registados na Mistura 2 pelo que se alcançou o pretendido.

A Mistura 5 foi realizada numa segunda-feira, dia 15 de maio de 2017. Nesta mistura decidiu-se utilizar como agregados a areia e brita. A adição da brita foi feita de modo a que o volume ocupado pela brita e a areia desta mistura fosse o mesmo que o ocupado pela areia da mistura anterior. Adicionalmente, pretendia-se obter uma composição granulometria da mistura que diminuísse o volume de vazios da mistura. Para tal existem várias metodologias que pretendem ajustar a granulometria da mistura a uma curva de referência. Uma dessas curvas de referência é a curva de Faury, que tem como ordenadas as percentagens de passados em peneiros e em abcissas a dimensão dos peneiros segundo uma escala logarítmica. Esta curva é constituída por dois segmentos de reta definidos por três pontos, A (0,0065mm;0%); B (D/2; y_B) e C (D;100%). A ordenada do ponto B, y_B , depende da dimensão máxima do agregado D , do raio hidráulico R , e os parâmetros A e B que estão relacionados com a trabalhabilidade e meios de compactação empregados, tal como é indicado na Equação 3.3.

$$y_B = A + 17 * \sqrt[5]{D} * \left(\frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \right) \quad (3.3)$$

O raio hidráulico R é o quociente entre o volume de betão V_b e a área em contacto com o betão A . A dimensão máxima do agregado D , segundo a definição de Faury, depende da maior abertura do peneiro no qual já se recolhem as maiores partículas, d_I , da abertura do peneiro

seguinte, d_2 , da percentagem do peso das partículas retidos no peneiro d_1 , x , e da percentagem do peso das partículas que passaram através de d_1 e ficaram retidas em d_2 , y , tal como indicado na Equação 3.4.

$$D = d_1 + (d_2 - d_1) * \left(\frac{x}{y}\right) \quad (3.4)$$

Para a areia e brita utilizadas na mistura obteve-se a curva de Faury, A (0,0065mm;0%); B (6,7mm; 52,9%) e C (13,33;100%). Com a curva de referência definida, chegou-se à conclusão que uma mistura cuja massa de agregados constituída por 55% de areia e 45% de brita seria a mais próxima da curva de referência de Faury. As curvas dos agregados, referência de Faury e da mistura são indicadas na Figura 3.5.

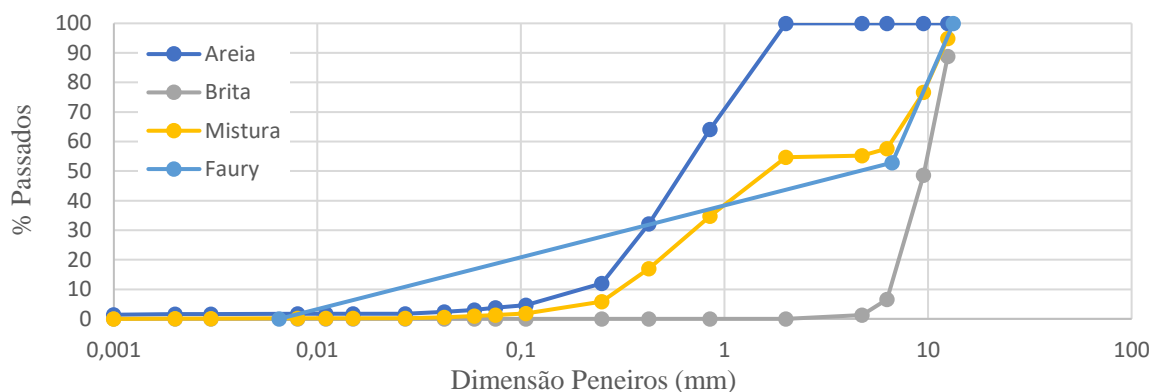


Figura 3.5 – Curvas Granulométricas dos agregados e da mistura.

Sabendo as percentagens de areia e brita apenas se teve que calcular uma massa total de agregados de modo a que ocupasse o mesmo volume que os agregados da mistura anterior. De referir que a brita foi adicionada na mistura após terem sido colocados o cimento e a areia na misturadora e adicionado água. Com a introdução da brita a relação água/cimento desceu para 0,384.

A Mistura 6 foi realizada numa segunda-feira, dia 19 de junho de 2017. Esta mistura é similar à mistura anterior tendo-se se adicionado apenas um superplastificante, que fez com que a relação água/cimento diminuísse para 0,291. Foi construído adicionalmente um provete cilíndrico, mas acabou por não ser testado.

Na tabela 3.4 são indicadas algumas características relevantes da realização das misturas, como a data, o número de provetes exteriores e interiores programados e ainda o intervalo de tempo entre a adição de água na mistura e o fecho da estufa Δt . Na tabela 3.5 são indicadas as

quantidades dos materiais usados nas misturas. Para as Misturas 1 a 5 a coluna “Traço” da Tabela 3.5 corresponde ao traço, em peso, cimento:areia:água. No entanto para as Misturas 5 e 6 corresponde, em peso, a cimento:areia:brita:água.

Tabela 3.4 – Características da realização das misturas.

	Data	Nº Prov Int	Nº Prov Ext	Δt [min]
Mistura 1	30 mar. 2017	13	6	40
Mistura 2	6 abr. 2017	13	6	30
Mistura 3	20 abr. 2017	13	10	25
Mistura 4	4 mai. 2017	13	10	25
Mistura 5	15 mai. 2017	13	10	30
Mistura 6	19 jun. 2017	13	10	30

Tabela 3.5 – Quantidades de materiais das misturas

	Traço (em peso)	Cimento [kg]	Areia [kg]	Água [L]	Brita [kg]	Superplast. [kg]
Mistura 1	1:2,5:0,5	37,5	93,8	18,8	-	-
Mistura 2	1:2,5:0,47	37,5	93,8	17,6	-	-
Mistura 3	1:2,5:0,47	45	112,5	21,2	-	-
Mistura 4	1:2,5:0,47	45	112,5	21,2	-	-
Mistura 5	1:1,5:1,23:0,384	45	67,5	17,3	55,2	-
Mistura 6	1:1,63:1,33:0,291	47,9	77,9	13,9	63,7	0,575

Por último importa referir que para as quatro primeiras misturas eram recolhidos dois sacos de cimento (~25kg/saco) para a realização de uma mistura, sendo o excesso utilizado para a mistura seguinte. Como se verá nos capítulos seguintes, a Mistura 2 teve um comportamento diferente das Misturas 1, 3 e 4 ao nível dos provetes exteriores, curados em condições ambientais, apesar de ter sido executada com as mesmas características que as misturas referidas tal como se indica na Tabela 3.5.

4 RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

No capítulo 4 serão apresentados os resultados de cada uma das misturas efetuadas. Primeiro será explicado o modo de obtenção de cada um dos gráficos apresentados e outros aspetos comuns entre misturas. De seguida serão expostos os resultados específicos para cada um dos conjuntos de provetes.

4.2 Aspetos comuns

Primeiramente será apresentado o registo das temperaturas absolutas no provete de controlo T_{prov} e no seu respetivo molde T_{molde} . Para o efeito foram colocados vários termopares tanto no molde como no provete, tal como foi referido no Capítulo 3. Para colmatar possíveis desvios nas leituras e ainda facilitar a visualização das temperaturas registadas foram utilizadas diferentes formas para obter uma temperatura absoluta das leituras registadas para o provete e molde de controlo.

No provete de controlo, uma vez que este foi equipado por dois termopares colocados no seu centro $T_{centro,1}$ e $T_{centro,2}$, optou-se por uma média aritmética entre as leituras nos dois termopares, tal como se representa na Equação 4.1.

$$T_{prov} = \frac{T_{centro,1} + T_{centro,2}}{2} \quad (4.1)$$

No molde, os termopares foram colocados em duas faces $T_{face,1}$ e $T_{face,2}$ e em dois cantos $T_{canto,1}$ e $T_{canto,2}$, pelo que se optou por uma média aritmética ponderada, dando-se uma maior relevância às temperaturas registadas nas faces, tal como se representa na Equação 4.2. Coincidindo com a metodologia utilizada no trabalho desenvolvido anteriormente por Longo (2016).

$$T_{molde} = \frac{2 * T_{face,1} + T_{canto,1} + 2 * T_{face,2} + T_{canto,2}}{6} \quad (4.2)$$

De seguida são apresentadas as diferenças de temperatura entre o molde e o provete em função do tempo, designadas por ΔT tal como se indica na Equação 4.3.

$$\Delta T = T_{molde} - T_{prov} \quad (4.3)$$

Seguidamente apresenta-se a média acumulada das diferenças de temperatura para cada instante $\Delta T_{ma}(t)$, tal como indicado na Equação 4.4.

$$\Delta T_{ma} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T)}{n} \quad (4.4)$$

Concluída a análise das temperaturas registadas no provete de controlo proceder-se-á ao estudo dos resultados obtidos nos ensaios de compressão. O *software* de controlo da prensa onde se realizaram os ensaios dos cubos registava os valores de deslocamento dos pratos (mm) e a força aplicada no provete $F_{aplicada}$ (toneladas). Esta força resulta da diferença entre a força máxima aplicada durante o ensaio $F_{aplicada,max}$ e uma força inicial exercida pela prensa antes de se registar o início do carregamento do provete $F_{aplicada,inicial}$. A tensão de rotura dos provetes ensaiados, σ_c , resulta do quociente entre a força aplicada no provete e a área da face do provete, A_{prov} (m²), tal como se representa na Equação 4.5.

$$\sigma_c = \frac{(F_{aplicada,max} - F_{aplicada,inicial}) * 9,8 * 1000}{A_{prov}} \quad [MPa] \quad (4.5)$$

Por último, a análise das tensões será feita considerando duas abcissas, a primeira em dias e a segunda denominada de “Maturidade”. Esta Maturidade, tal como se indica na Equação 4.6, depende do número dias do provete e de uma temperatura constante, tendo-se considerado 20°C sendo esta a temperatura ambiente média registada no laboratório. Esta é calculada de modo a se poder analisar a evolução das tensões resistentes de compressão segundo linhas de tendências lineares sugeridas por Neville (2004).

$$\text{"Maturidade"} = \log_{10} \left(\frac{20^{\circ C * n^{\circ} dias * 24}}{1000} \right) \quad (4.6)$$

4.3 Provetes da Mistura 1

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos relativamente à Mistura 1, realizada na quinta-feira, dia 30 de março de 2017. A água foi adicionada à mistura pelas 10h, tendo se fechado a estufa cerca de 40min depois. Recorda-se que neste ensaio, os provetes colocados no interior da estufa não beneficiaram de qualquer calor produzido por esta. Tratou-se de um ensaio inicial onde se pretendeu apurar a metodologia a aplicar nos seguintes. No Gráfico 4.1 apresentam-se, ao longo do tempo, as temperaturas registadas no molde T_{molde} no provete de controlo T_{prov} e a temperatura ambiente exterior T_{ext} .

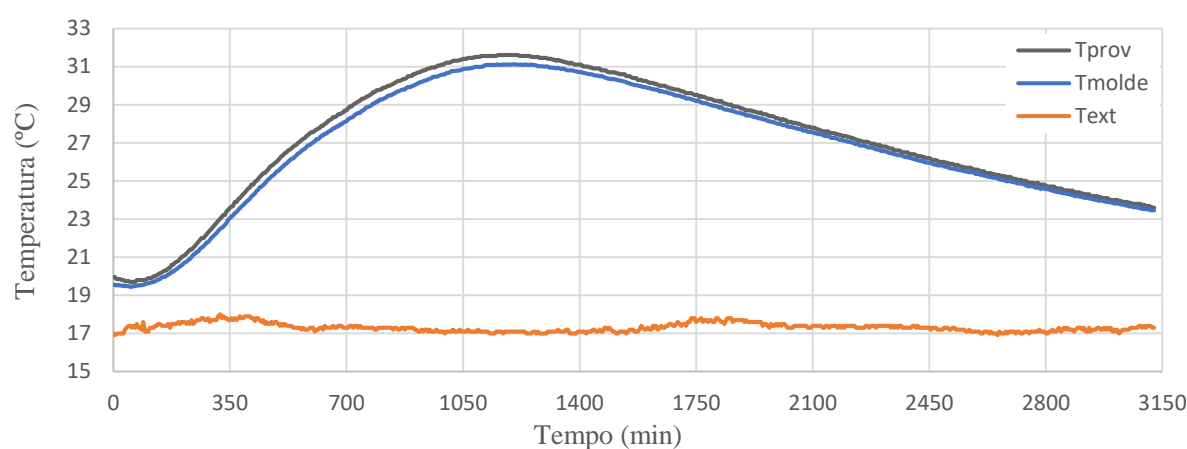


Gráfico 4.1 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 1.

No instante inicial, correspondente ao fecho da estufa, após colocação de todos os moldes na mesma, a temperatura do provete era de 20°C, cerca de 3°C acima da temperatura ambiente exterior. Admitindo que os materiais estariam à temperatura ambiente exterior, presume-se que esta diferença surge devido ao facto da reação exotérmica entre a água e o cimento ter-se iniciado antes do instante inicial. Num primeiro período do registo, até cerca de 65min, a temperatura no provete desceu até 19,7°C devido essencialmente a perdas de calor da mistura para o molde metálico. Num segundo período, até cerca de 1250min, a temperatura do provete aumentou até 31,6°C, a taxas não superiores a 0,2°C/10min, correspondendo a um ganho total de 11,9°C em aproximadamente 20 horas. Finalmente, a partir dos 1250min, a temperatura no provete decresceu, tendo-se efetuado um registo de 23,6°C aos 3125min.

No Gráfico 4.2 apresentam-se as diferenças de temperatura entre o molde e o provete ΔT . Neste gráfico observa-se que a temperatura do molde esteve sempre abaixo da do provete durante todo o ensaio, não ultrapassando 0,65°C. Ficam patentes as perdas de calor do provete para o meio envolvente na justa medida em que a temperatura do molde é sempre inferior à do provete. Esta diferença foi aumentando na fase de evolução positiva de temperaturas, atingindo os

valores máximos quando a taxa de aumento da temperatura do provete foi superior. Este calor foi utilizado não só para elevar a temperatura dos moldes metálicos, mas também de todos os materiais envolventes na estufa. Também é necessário considerar algumas perdas de calor da estufa para o exterior, como se comprova na fase descendente das temperaturas. De facto, nesta fase, o valor de T_{molde} continua a ser inferior a T_{prov} , o que demonstra existirem algumas perdas de calor por parte do molde.

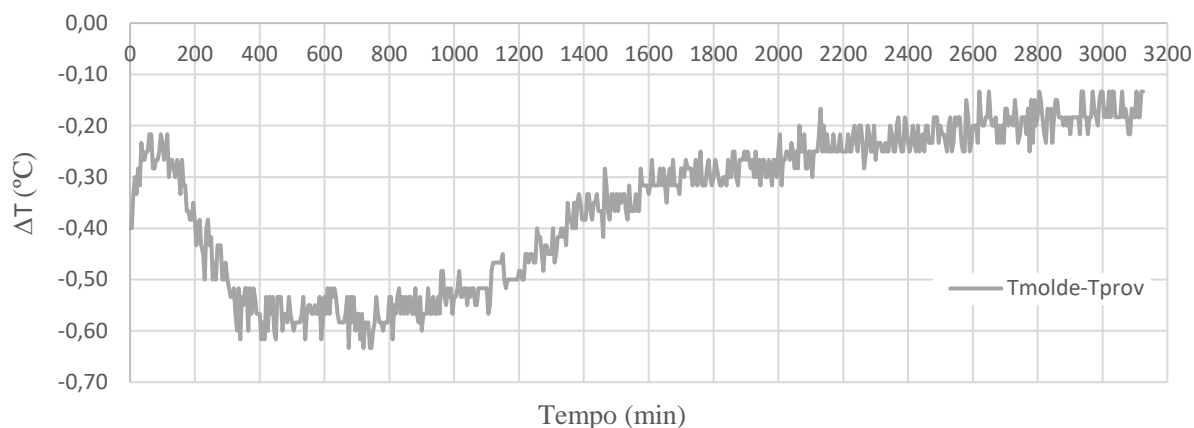


Gráfico 4.2 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 1.

No Gráfico 4.3 apresenta-se a média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} calculada para cada instante, tendo como base os valores de ΔT . Não sendo importante este gráfico neste ensaio, optou-se por o colocar para efeitos de comparação da magnitude dos valores atingidos nos ensaios seguintes. De facto, este gráfico mostra que em média esteve-se sempre a retirar cerca de $0,4^{\circ}\text{C}$ ao provete. Por outras palavras, tratou-se de um ensaio muito afastado de se poder considerar como adiabático.

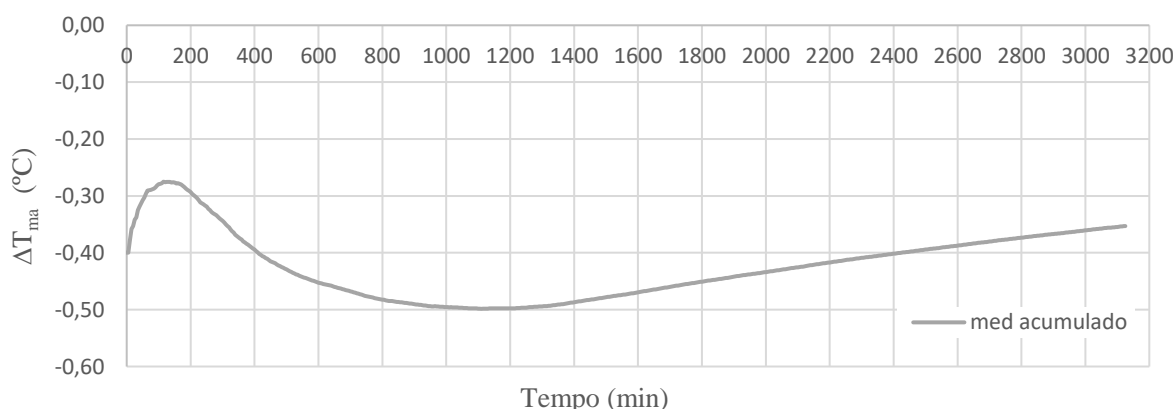


Gráfico 4.3 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 1.

Nos Gráficos 4.4 e 4.5 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão para a tensão resistente dos provetes ao longo do tempo. No primeiro, as abcissas são em dias; no segundo, recorre-se à Maturidade, definida anteriormente pela Equação 4.6 segundo as sugestões de Neville (2004). Para além disso, nestes gráficos são ainda representadas as correspondentes linhas de tendência.

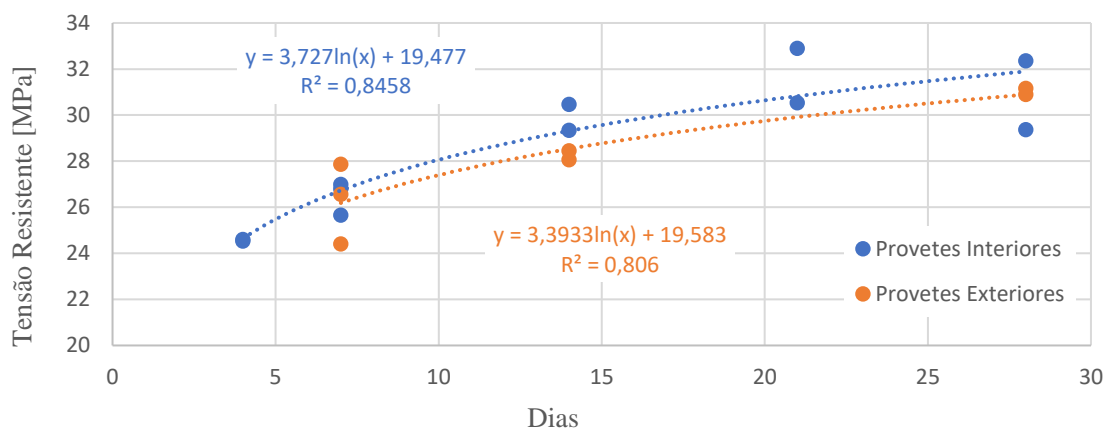


Gráfico 4.4 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 1.

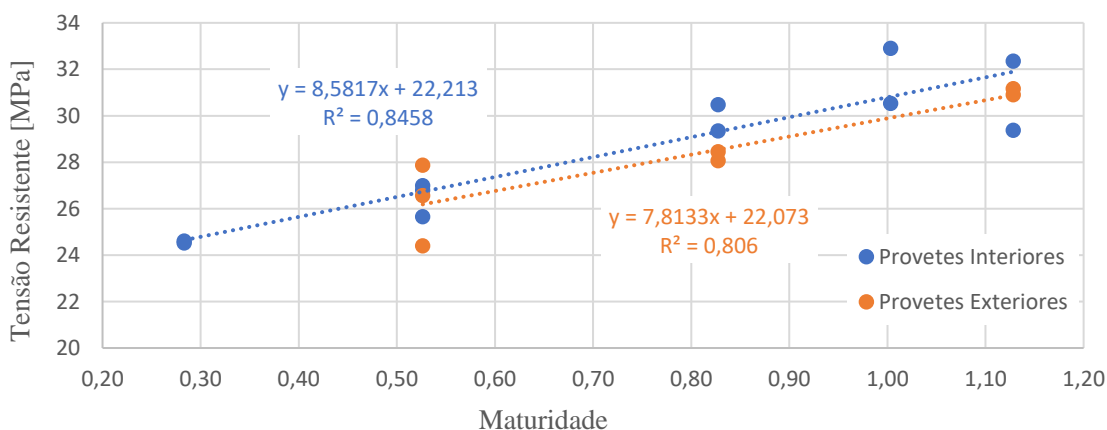


Gráfico 4.5 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 1.

Admitindo os resultados apresentados, e tendo em conta o valor R^2 apresentado, o qual traduz o afastamento dos valores apresentados relativamente à linha de tendência, é visível que a dispersão dos resultados dos provetes interiores é inferior à dos provetes exteriores. Para além disso, a resistência apurada para os provetes interiores foi ligeiramente superior: por exemplo, o valor estimado para a tensão resistente à compressão aos 28 dias foi cerca de 31,9MPa para os provetes interiores e cerca de 30,9MPa para os provetes exteriores, cerca de 3% superior,

portanto. Relativamente à evolução da resistência verifica-se ser equivalente entre os 2 conjuntos de resultados, é possível perceber um ligeiro acréscimo nos provetes interiores relativamente aos exteriores. De qualquer modo, neste caso em que as temperaturas interiores e ambiente divergiram menos do que 12°C, não foram evidentes variações significativas da resistência à compressão.

4.4 Provetes da Mistura 2

Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos relativamente à mistura 2, realizada a 6 de abril de 2017. De recordar que esta mistura coincidia com a anterior variando apenas a relação água/cimento de 0,50 para 0,47. Entre a adição da água à mistura e o fecho da estufa passaram-se 30min. Importa salientar que neste ensaio pretendia-se executar um ensaio de cura adiabática dos provetes curados no interior da estufa. No Gráfico 4.6 apresentam-se as temperaturas registadas no molde, no provete de controlo e a temperatura ambiente exterior.

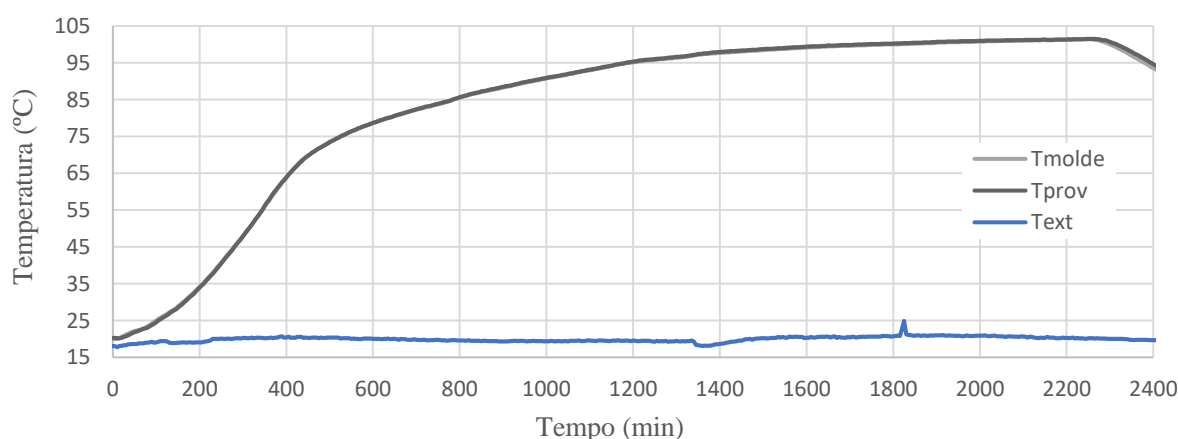
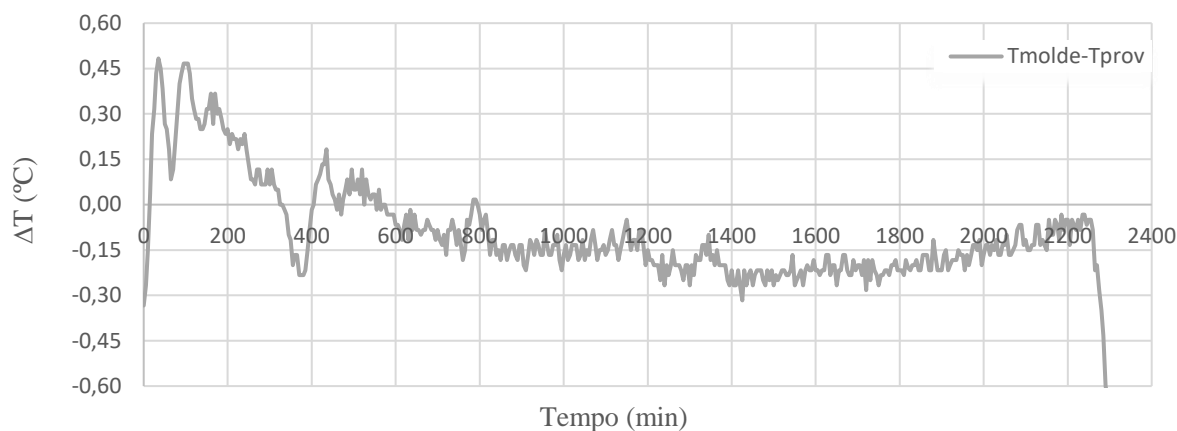


Gráfico 4.6 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 2.

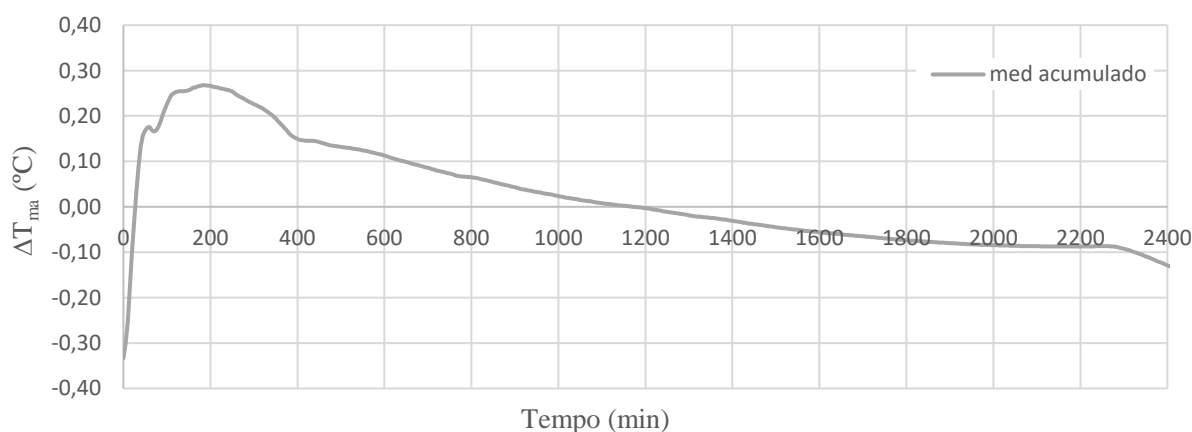
A temperatura inicial do provete foi de 20,3°C, 2,2°C acima da temperatura ambiente exterior. Nos primeiros 20min a temperatura do provete manteve-se quase constante. O segundo período, dos 20min aos 450min, correspondeu à fase de crescimento mais acentuado da temperatura do provete, tendo esta aumentado até 69,8°C a taxas não superiores a 1,8°C/10min; no total houve um ganho de 49,5°C em 7 horas e meia. A partir dos 450min, e até aos 2255min, a evolução da temperatura ocorreu a taxas sucessivamente inferiores, chegando a valores finais da ordem dos 0,1°C/10min, pelo que se deixou de se operar a estufa. A temperatura máxima atingida no provete foi de cerca de 101,5°C.

No Gráfico 4.7 apresentam-se as diferenças de temperatura ΔT entre o molde e o provete.

Gráfico 4.7 – Diferenças de temperatura ΔT . Mistura 2

Tendo em conta o objetivo do ensaio adiabático, a situação ideal corresponderia a $\Delta T \sim 0$ durante este processo, isto é, que não fosse fornecido calor ($\Delta T > 0$), nem retirado calor ($\Delta T < 0$) ao provete. Caso fosse possível cumprir com o proposto, não haveria nenhuma perturbação na evolução da temperatura na mistura ao longo da sua cura, fazendo assim coincidir com a temperatura atingida num maciço infinito. No entanto, para efeitos práticos, definiu-se um objetivo em termos das diferenças de temperatura ΔT entre o molde e o provete; pretendia-se que fossem inferiores a $0,5^\circ\text{C}$. Na Mistura 2, as diferenças de temperatura não ultrapassam $\pm 0,30^\circ\text{C}$ ao longo do ensaio, exceto no início e depois quando a estufa deixou de ser operada. Neste contexto, pode afirmar-se que o ensaio decorreu dentro dos limites pretendidos.

No Gráfico 4.8 apresenta-se a média acumulada ΔT_{ma} das diferenças de temperatura.

Gráfico 4.8 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 2.

Com exceção dos minutos iniciais, é possível observar que ΔT_{ma} manteve-se entre $\pm 0,30^{\circ}\text{C}$ ao longo do ensaio. A partir dos 655min (~11h) passou a manter-se entre $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$ até ao momento em que se deixou de operar a estufa aos 2255min. A transição de $+0,1^{\circ}\text{C}$ para $-0,1^{\circ}\text{C}$ é resultado da decisão de se manter o mesmo tempo de ligação da estufa/intervalos de 5min para que não se criassem perturbações adicionais. Tendo em conta estes valores relativamente baixos, da ordem de precisão do equipamento utilizado, é possível afirmar que as condições de fronteira de um maciço infinito foram recriadas com sucesso.

Nos Gráficos 4.9 e 4.10 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão para a tensão resistente dos provetes ao longo do tempo e as correspondentes curvas de tendência. Tal como no caso anterior, as abcissas são em dias no primeiro gráfico e recorre-se à Maturidade no segundo gráfico.

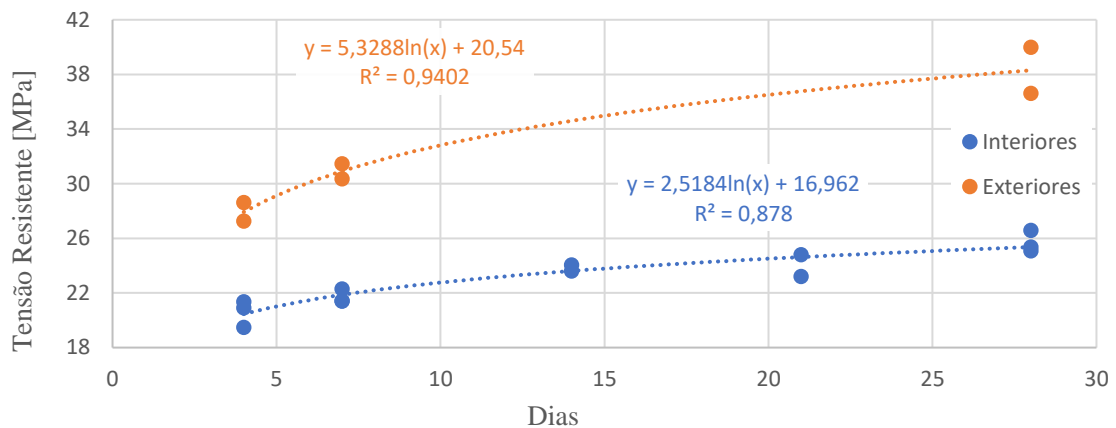


Gráfico 4.9 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 2.

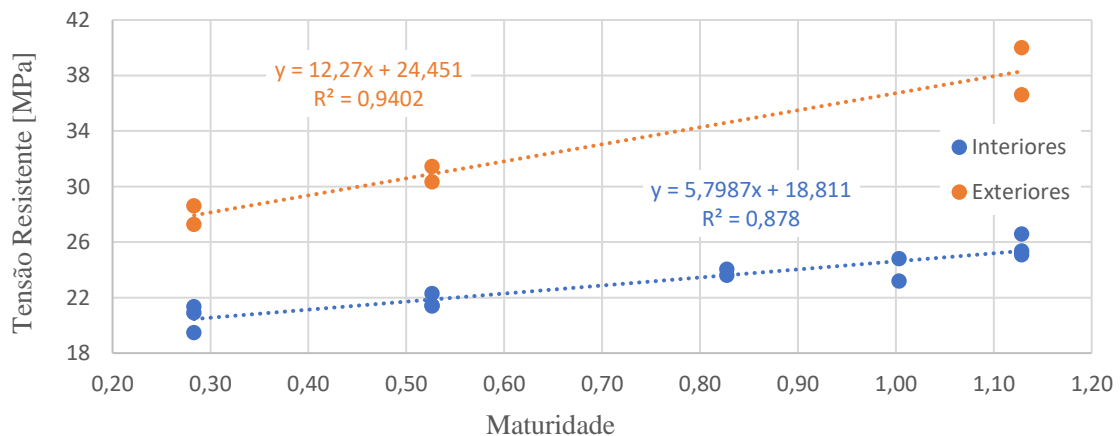


Gráfico 4.10 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 2.

Tendo em conta que se trata de uma mistura equivalente à Mistura 1, a superior resistência observada nos provetes exteriores poderá dever-se ao facto de esta mistura ter sido executada com um cimento de melhor qualidade. De facto, os provetes da Mistura 2 evidenciam uma resistência superior aos 28 dias em cerca de 7,4MPa (~24%). Este acréscimo resulta essencialmente de um crescimento superior da resistência ao longo do tempo. Para além disso, verifica-se uma menor dispersão de resultados desta mistura relativamente à anterior. Relativamente aos provetes desta mistura, constata-se que a dispersão dos resultados nos provetes exteriores é inferior à dos provetes interiores, tal como mostra o valor de R^2 . Quanto à resistência, esta inicia-se superior e cresce mais nos provetes exteriores do que nos provetes interiores. Assumindo os valores das linhas de tendência, é visível que a tensão resistente estimada para os provetes interiores vale menos 3,6MPa (~17,5%) no primeiro dia. Aos 28 dias, a resistência apurada para os provetes interiores é significativamente inferior, sendo o valor estimado para a tensão resistente à compressão de 24,5MPa para os provetes interiores e 38,3MPa para os provetes exteriores; uma diferença de cerca de 13,8Mpa (~36% inferior). Resta acrescentar que as temperaturas interiores e ambiente divergiram cerca de 80°C.

4.5 Provetes da Mistura 3

Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos relativamente à mistura 3, realizada a 20 de abril de 2017. A adição da água à mistura ocorreu por volta das 9:40, tendo-se se fechado a estufa 25min depois. De recordar que nesta mistura se manteve o mesmo traço, 1:2,5:0,47, que a Mistura 2. Tendo sido feitos quatro provetes exteriores adicionais. Tal como para a mistura anterior, pretendia-se realizar um ensaio de cura adiabática dos provetes interiores. Importa ainda referir que nesta mistura, se verificou, após a destruição do provete, que os termopares colocados para medir a temperatura no interior do provete de controlo sofreram um desvio. Esse desvio terá ocorrido devido a uma vibração e colocação na estufa menos correta. Para que tal não voltasse a acontecer foi colocada fita cola de modo a segurar melhor os termopares, garantindo que estes ficassem no local pretendido. No Gráfico 4.11 apresentam-se as evoluções temporais das temperaturas registadas no molde, no provete de controlo e a temperatura ambiente exterior.

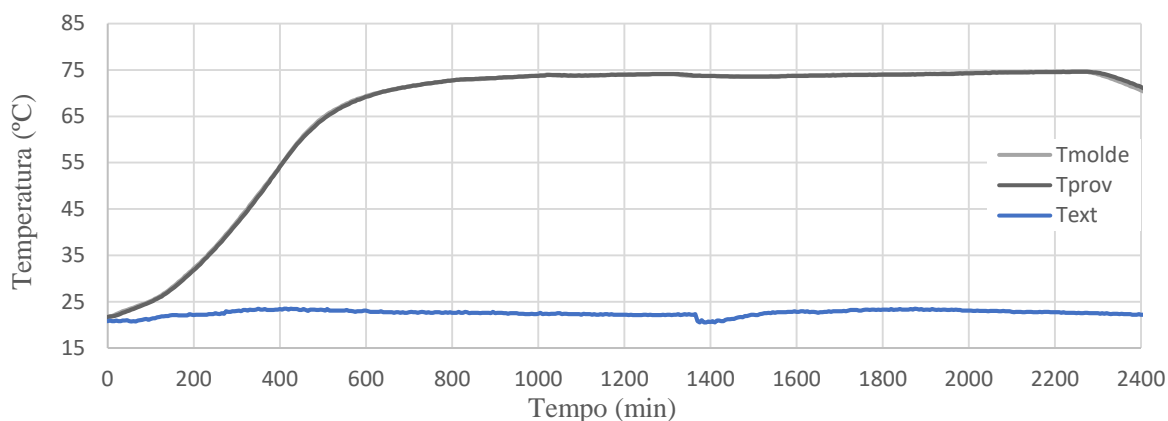


Gráfico 4.11 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 3.

Um primeiro registo da temperatura do provete apontou um valor de 21,7°C, 1°C superior relativamente à temperatura ambiente exterior. Nos primeiros 15min, a temperatura do provete manteve-se constante. O período seguinte, até aos 500min, correspondeu à maior fase de crescimento da temperatura do provete, tendo-se chegado a 64,3°C, a taxas não superiores a 1,4°C/10min; no total houve um ganho de 42,6°C em cerca de 8 horas. Dos 500min aos 1315min, a evolução da temperatura deu-se a ritmos cada vez mais baixos, chegando-se a uma temperatura do provete de 74,2°C. Houve, no entanto, um equívoco na utilização da estufa que conduziu a uma redução da temperatura do provete até aos 73,6°C; apenas se conseguiu compensar a partir dos 1565min. Por volta dos 2275min a taxa da evolução da temperatura do provete rondava os 0,05°C/10min, pelo que se deixou de operar a estufa. A temperatura máxima registada no provete foi cerca de 74,6°C.

No Gráfico 4.12 apresentam-se as diferenças de temperatura ΔT .

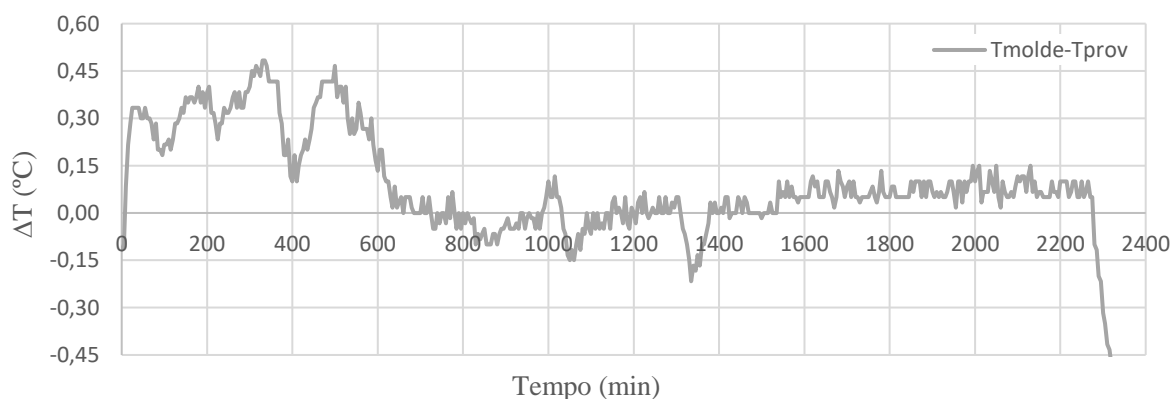


Gráfico 4.12 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 3.

Para a Mistura 3 é possível observar que as diferenças de temperatura foram inferiores a $0,5^{\circ}\text{C}$ durante as primeiras 10h. No entanto observa-se que entre 120min e 500min ΔT não se obteve uma tendência decrescente como na Mistura 2. Tal aconteceu porque a Mistura 2 teve um comportamento muito diferente, registando temperaturas mais altas e um maior crescimento. Sendo apenas a terceira mistura realizada, a segunda com operação da estufa e atendendo à dificuldade acrescida da metodologia descrita no Capítulo 3 somente a partir dos 590min e até se deixar de operar a estufa se reduziu e estabilizou ΔT . Todavia o ensaio decorreu segundo os limites propostos.

No Gráfico 4.13 apresenta-se a média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} .

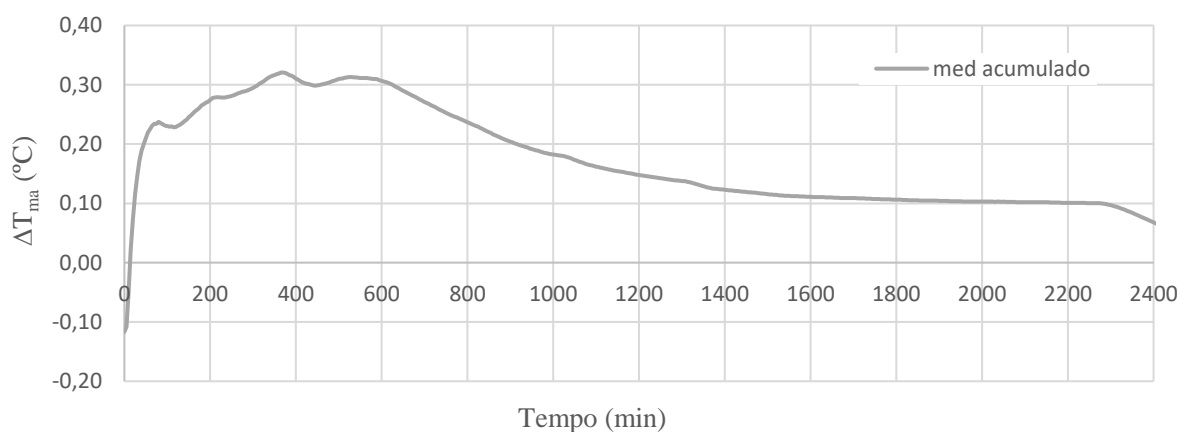


Gráfico 4.13 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 3.

Para a Mistura 3 observa-se que ΔT_{ma} manteve-se entre $+0,35^{\circ}\text{C}$ e $-0,15^{\circ}\text{C}$ durante a duração do ensaio. A partir dos 900min (15h) e até se deixar de operar a estufa, ΔT_{ma} passou a manter-se entre os $+0,20^{\circ}\text{C}$ e $+0,05^{\circ}\text{C}$.

Nos Gráficos 4.14 e 4.15 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão para a tensão resistente dos provetes ao longo do tempo e as correspondentes curvas de tendência.

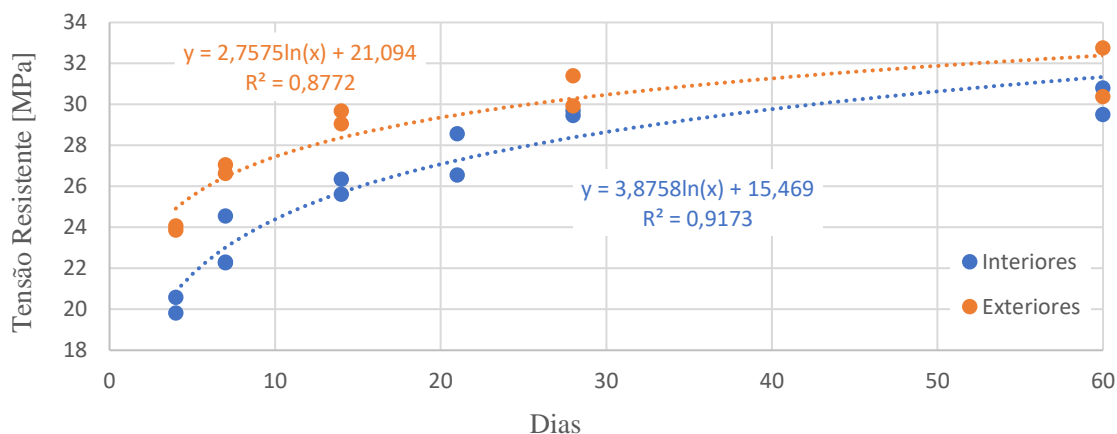


Gráfico 4.14 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 3.

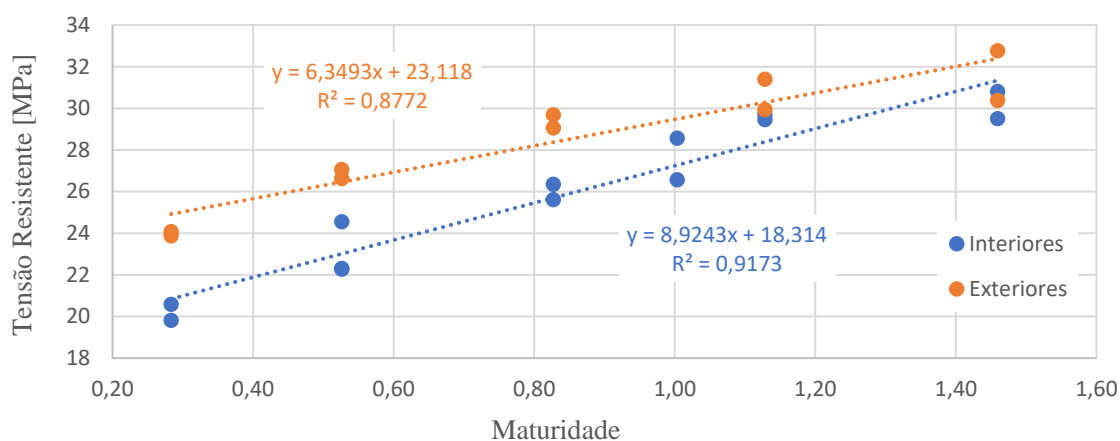


Gráfico 4.15 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 3.

Os provetes exteriores da Mistura 3 exibem aos 28 uma resistência inferior aos provetes exteriores da Mistura 2 de cerca de 8MPa. Para a Mistura 3, a evolução da resistência foi inferior e existiu uma maior dispersão nos resultados, quando comparando com a mistura anterior. Comparando os provetes exteriores e interiores desta mistura, tendo em conta o valor de R^2 , constata-se que a dispersão dos resultados é maior para os provetes exteriores. Relativamente à resistência, é superior nos exteriores, crescendo, no entanto, a um ritmo inferior ao dos interiores. Seguindo as linhas de tendência, a resistência estimada para os provetes interiores é cerca de 2,2MPa inferior no primeiro dia. Aos 28 dias a resistência dos provetes interiores é inferior, estimando-se um valor da tensão resistente à compressão de 28,4MPa para os provetes interiores e 30,3MPa para os provetes exteriores; uma diferença de 1,9MPa (~6,3%). Por último acrescenta-se que as temperaturas interiores e ambiente divergiram cerca de 50°C).

4.6 Provetes da Mistura 4

Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos relativamente à Mistura 4, realizada a 4 de maio de 2017. Pelas 9:50 adicionou-se a água à mistura, tendo-se fechado a estufa 25min depois. Importa referir que a composição desta mistura é idêntica à da Misturas 3. No Gráfico 4.16 apresentam-se as temperaturas registadas no molde, no provete e a temperatura ambiente exterior.

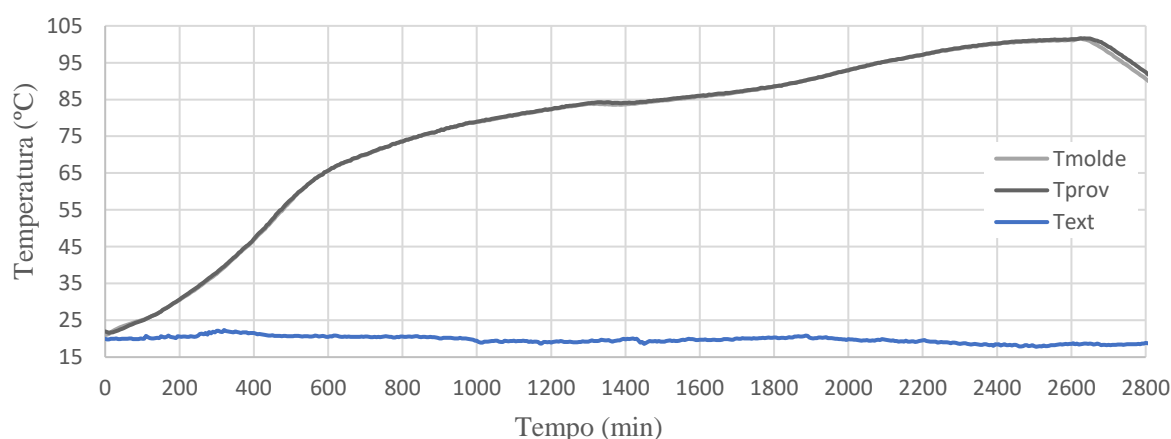
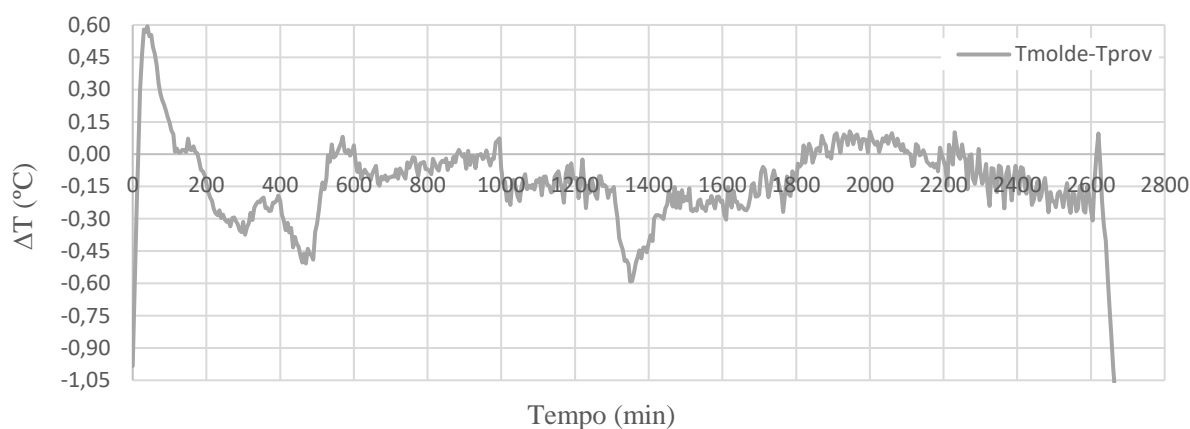


Gráfico 4.16 – Temperaturas registadas no molde, provete de controlo e temperatura ambiente exterior da Mistura 4.

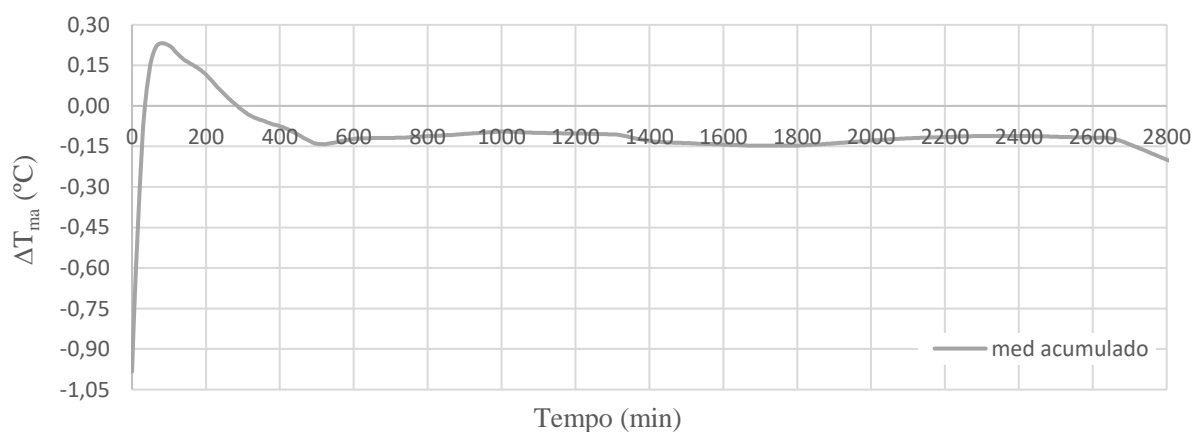
No instante inicial a temperatura do provete registada foi de 22°C, cerca de 2°C acima da temperatura ambiente exterior. Nos primeiros 10min a temperatura do provete desceu até aos 21,6°C devido essencialmente a um percalço na preparação da estufa; a temperatura inicial da estufa encontrava-se abaixo do pretendido. No intervalo 10min - 540min ocorreu o crescimento mais acentuado da temperatura do provete, tendo esta chegado a 61,3°C, a taxas não superiores a 1,4°C/10min; no total houve um ganho de 39,7°C em aproximadamente 9h. A partir daí a evolução da temperatura deu-se a um ritmo mais lento. Aos 1300min existiu um engano relativamente ao intervalo de tempo que a resistência da estufa deveria estar ligada, que fez com que o molde não acompanhasse o provete durante algum tempo. Tal provocou uma perturbação no ritmo da evolução da temperatura do provete. Aos 2625min a taxa de evolução da temperatura do provete era de 0,1°C/10min pelo que se deixou de operar a estufa. A temperatura máxima atingida no provete foi de 102°C.

No Gráfico 4.17 apresentam-se as diferenças de temperatura entre o molde e o provete ΔT .

Gráfico 4.17 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 4.

Na Mistura 4 não se gerou temperatura suficiente na estufa antes da colocação dos provetes na estufa pelo que se tentou compensar na 1ª hora do ensaio. De seguida o provete começou a adquirir temperatura, fruto das reacções exotérmicas entre o cimento e água. A geração de calor suficiente dentro da estufa, de modo a que o molde acompanhasse o provete, apenas se alcançou por volta dos 530min.

No Gráfico 4.18 apresenta-se a média acumulada das diferenças de temperatura, ΔT_{ma} .

Gráfico 4.18 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 4.

É visível que a partir dos 285min (~5h), que ΔT_{ma} se manteve entre 0°C e -0,2°C. Tendo em conta estes valores relativamente baixos, pouco acima da ordem de precisão do equipamento

utilizado, considera-se que as condições de fronteira de um maciço infinito foram recriadas com relativo sucesso.

Nos Gráficos 4.19 e 4.20 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão para a tensão resistente dos provetes ao longo do tempo e as correspondentes curvas de tendência.

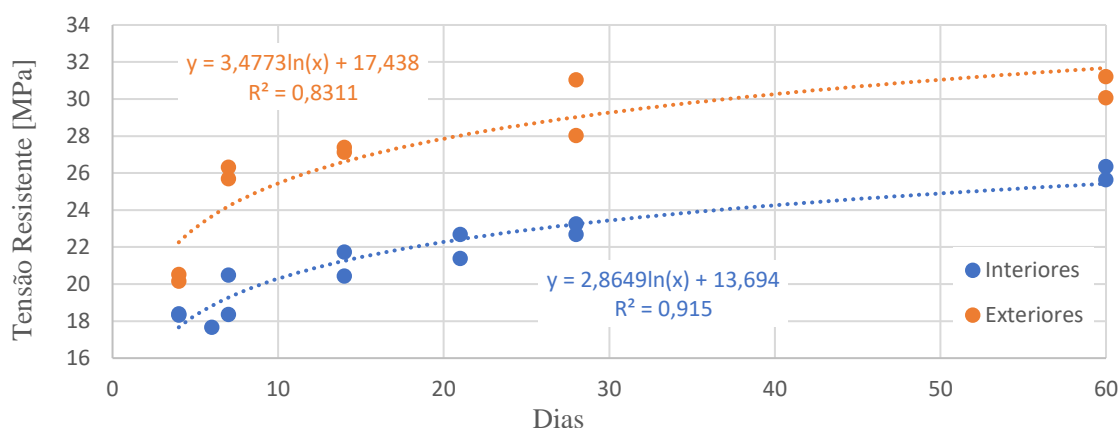


Gráfico 4.19 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 4.

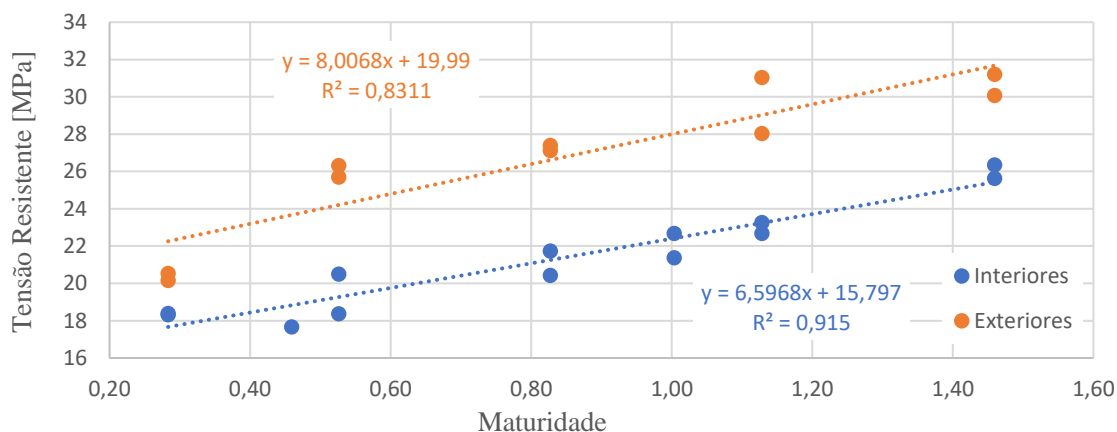


Gráfico 4.20 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 4.

Comparando com as duas misturas anteriores, uma vez que são semelhantes quanto à sua composição, os provetes exteriores da mistura 4 exibem, aos 28 dias, uma resistência inferior em cerca de 9,3MPa (~24%) e 1,3MPa (~4,3%) em relação às Misturas 2 e 3, respetivamente. Relativamente ao crescimento da resistência ao longo do tempo, a Mistura 4 cresce menos do que a Mistura 2, mas cresce um pouco mais do que a Mistura 3. Quanto à dispersão de resultados dos provetes exteriores, constata-se que é superior à das misturas anteriores.

Quanto aos provetes interiores e exteriores da Mistura 4 observa-se que a dispersão de resultados dos provetes interiores é inferior à dos exteriores. Tal como na Mistura 2, a resistência dos provetes exteriores inicial é superior bem como o seu crescimento ao longo do tempo. Tendo como base as linhas de tendência, a tensão resistente estimada para os provetes interiores vale menos 3,7MPa (~21,5%) no primeiro dia. Aos 28 dias a tensão resistente à compressão estimada para os provetes interiores foi de 23,2MPa, inferior à estimada para os provetes exteriores; diferença de cerca de 5,8MPa (~20%). Por último, acrescenta-se que as temperaturas interiores e ambiente divergiram em cerca de 80°C.

4.7 Provetes da Mistura 5

Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos relativamente à mistura 5, realizada a 15 de maio de 2017. A adição da água à mistura ocorreu por volta das 10:15 tendo se fechado a estufa cerca de 30min depois. Para esta mistura foi introduzido um novo parâmetro, tendo-se adicionado brita, de modo a manter constante o volume ocupado pelos agregados. Com a adição da brita, a relação água/cimento passou de 0,47 para 0,384. No Gráfico 4.21 apresentam-se as temperaturas registadas no molde, no provete de controlo e a temperatura ambiente exterior.

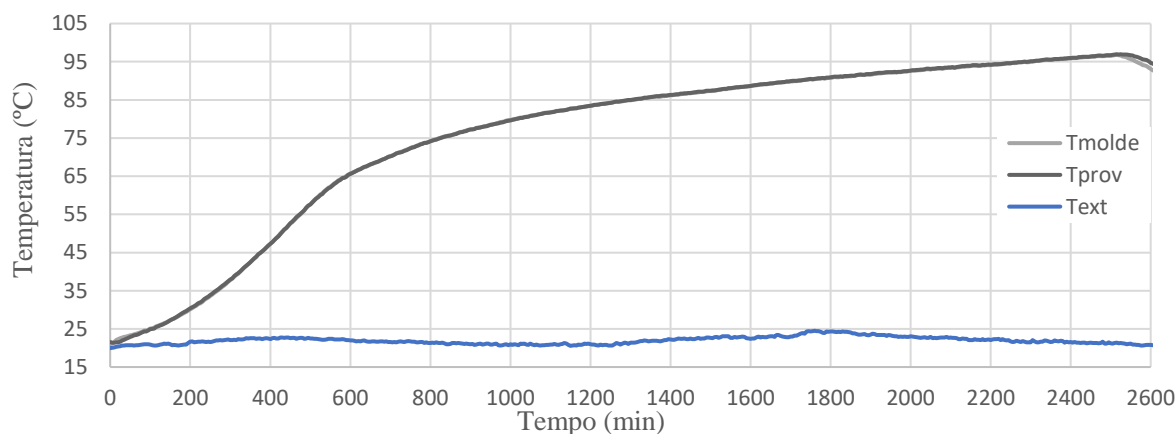


Gráfico 4.21 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 5.

A temperatura inicial do provete foi de 21,6°C, 1,6°C acima da temperatura ambiente exterior. Tal como nos casos anteriores, nos primeiros 20min, a temperatura do provete desceu até 21,4°C. No intervalo 20min-530min ocorreu a fase de crescimento mais acentuado da temperatura do provete, chegando a 60,3°C a taxas não superiores a 1,3°C/10min; no total houve um ganho de 38,9°C em 8 horas e meia. Depois disso, a temperatura do provete foi subindo a

ritmos inferiores, chegando a $0,1^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ por volta dos 2500min pelo que se deixou de operar a estufa. A temperatura máxima registada no provete foi de cerca de $96,9^{\circ}\text{C}$.

No Gráfico 4.22 apresentam-se as diferenças de temperatura entre o molde e o provete ΔT . Excetuando o início, e depois de se ter deixado de operar a estufa, ΔT nunca excedeu o limite de $\pm 0,50^{\circ}\text{C}$ proposto anteriormente. Constata-se também que a partir dos 290min ΔT manteve-se entre $\pm 0,20^{\circ}\text{C}$.

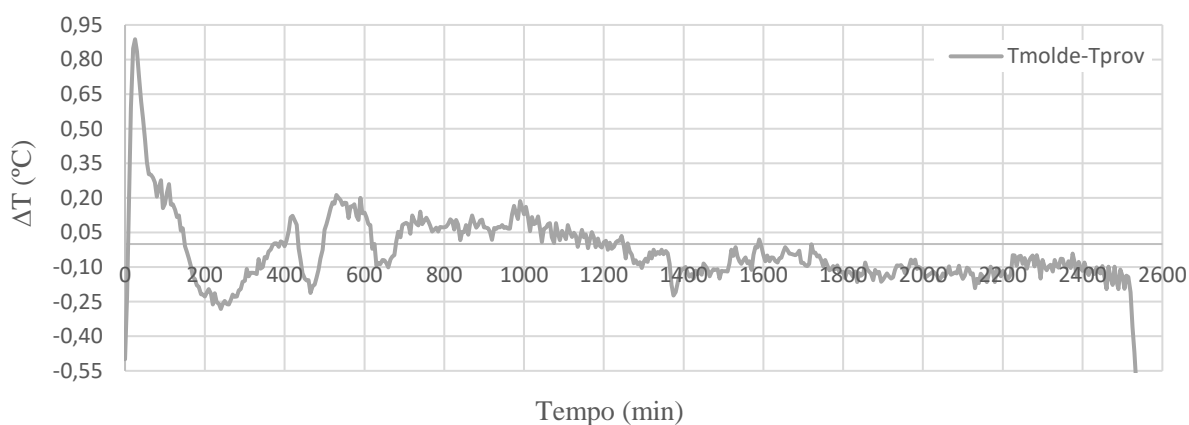


Gráfico 4.22 – Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 5.

No Gráfico 4.23 apresenta-se a média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Na Mistura 5, ΔT_{ma} manteve-se entre $\pm 0,10^{\circ}\text{C}$ após 250min do início, pelo que se considerou que as condições de fronteira de um maciço infinito foram recriadas com sucesso.

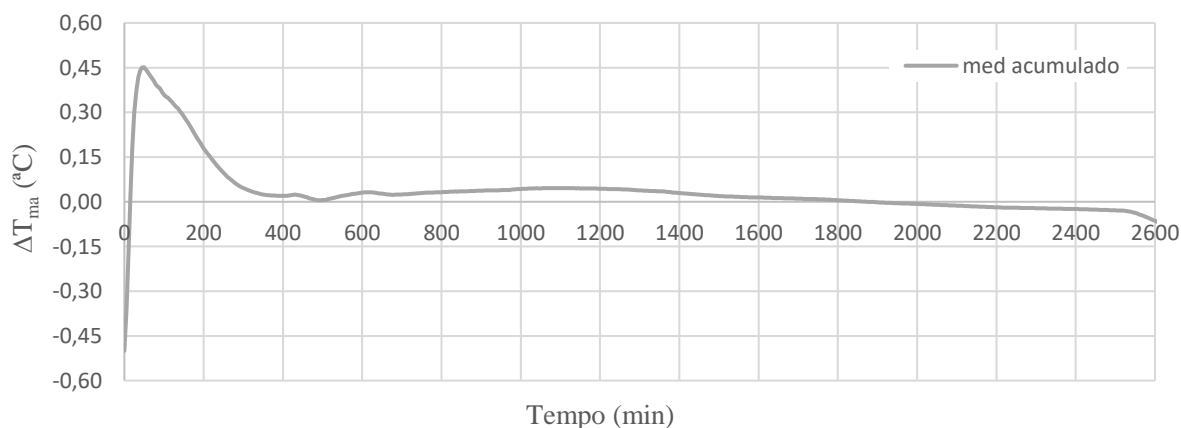


Gráfico 4.23 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 5.

Nos Gráficos 4.24 e 4.25 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão para a tensão resistente dos provetes ao longo do tempo.

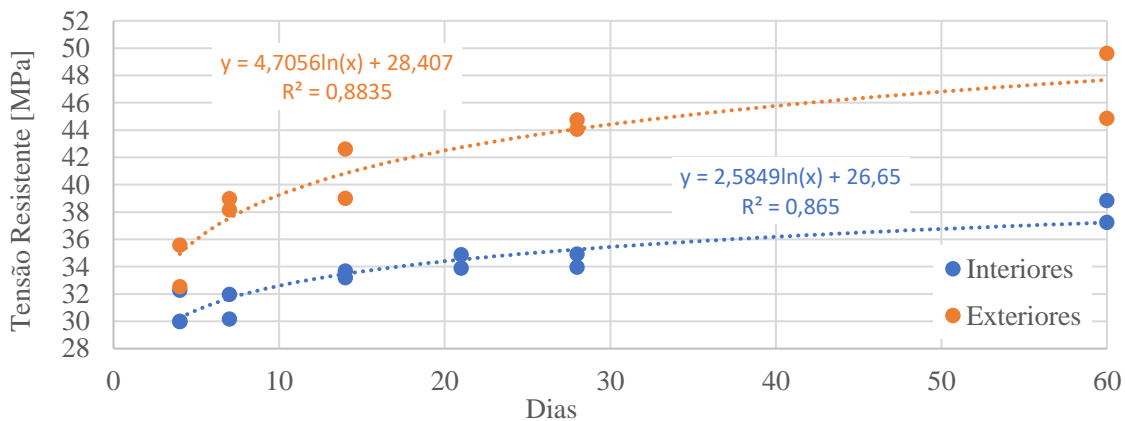


Gráfico 4.24 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 5.

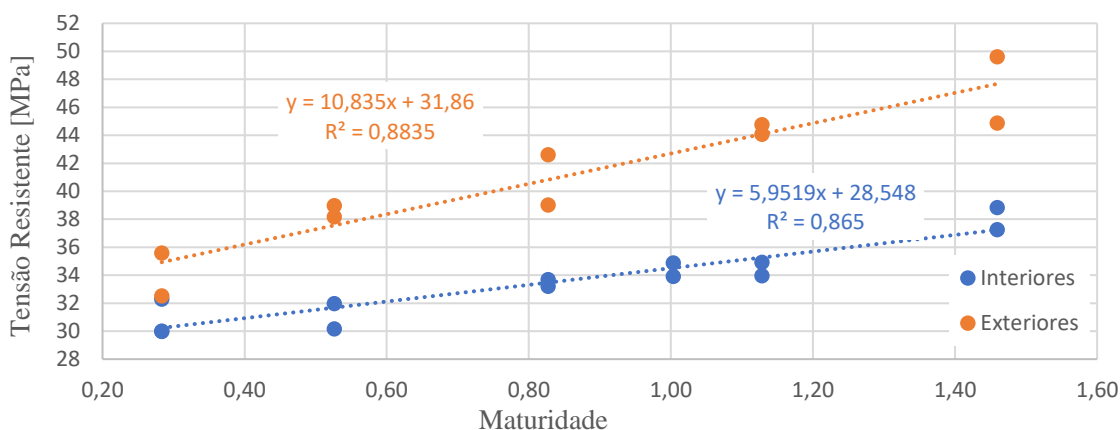


Gráfico 4.25 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 5.

De um modo geral, os resultados são qualitativamente equivalentes aos verificados na Mistura 2, i.e., relativamente aos provetes exteriores, os provetes interiores evidenciam perdas de resistência cada vez maiores ao longo do tempo. Relativamente aos provetes desta mistura, constata-se que a dispersão de resultados é ligeiramente superior nos provetes interiores. Quanto à resistência, inicia-se superior e apresenta um maior crescimento nos provetes exteriores. Assumindo os valores das linhas de tendência, a tensão resistente à compressão estimada para os provetes interiores é cerca de 1,8MPa (~6%) inferior no primeiro dia. Para $t=28d$, a tensão resistente estimada para os provetes interiores foi significativamente inferior (35,3MPa) à dos provetes exteriores (44,1MPa); uma diferença de 8,8MPa (~20%)

aproximadamente. Quanto às temperaturas interiores e ambiente, estas divergiram cerca de 75°C.

4.8 Provetes da Mistura 6

Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos relativamente à mistura 6, realizada a 19 de junho de 2017. Em relação à mistura anterior, nesta foi adicionado um superplastificante, tendo como resultado uma nova relação água/cimento de 0,291. No Gráfico 4.26 apresentam-se as temperaturas registadas no molde, no provete de controlo e a temperatura ambiente exterior.

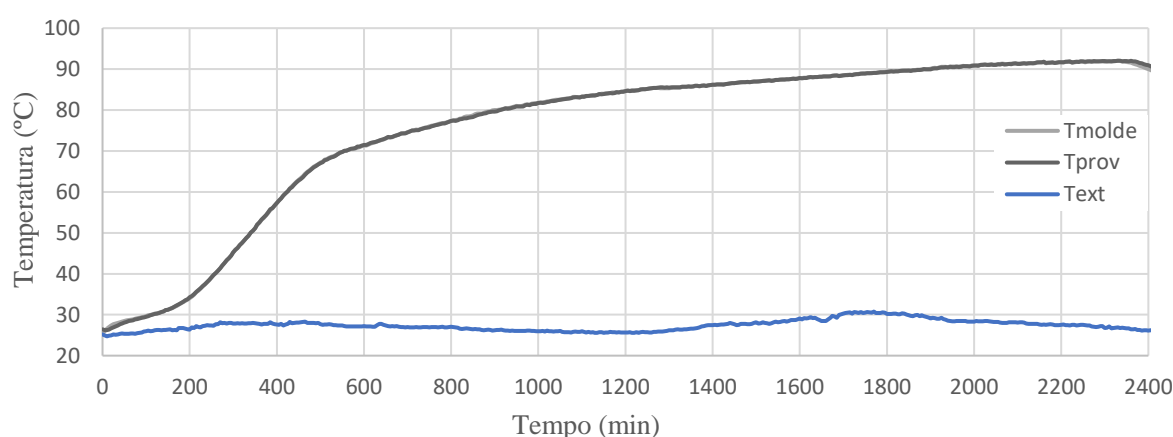


Gráfico 4.26 – Temperaturas registadas no molde, provete e exterior. Mistura 6.

Nos instantes iniciais, a temperatura do provete foi de 26,5°C, 1,3°C acima da temperatura ambiente exterior. A fase de maior crescimento da temperatura do provete aconteceu mais tarde, no intervalo 150min-500min; no total houve um ganho de 35,8°C em quase 6 horas. Este crescimento ocorreu a taxas não superiores a 1,6°C/10min. Tendo em conta os resultados da Mistura 5, a taxa de crescimento da temperatura é superior e o intervalo de tempo em que decorre é significativamente inferior; acredita-se que a adição do superplastificante justifica estas alterações de comportamento. Após este período, o crescimento foi ocorrendo a ritmos inferiores. Para $t=2335\text{min}$ a taxa de evolução da temperatura rondava 0,1°C/10min, pelo que se deixou de operar a estufa. A temperatura máxima registada no provete foi de 92°C, um valor pouco inferior ao da mistura anterior.

No Gráfico 4.27 apresentam-se as diferenças de temperatura entre o molde e o provete ΔT . As diferenças de temperatura não ultrapassaram em geral $\pm 0,20^\circ\text{C}$; exceto no início, depois de se

ter deixado de operar a estufa e ainda num período intermédio onde se foi menos eficaz na operação da estufa.

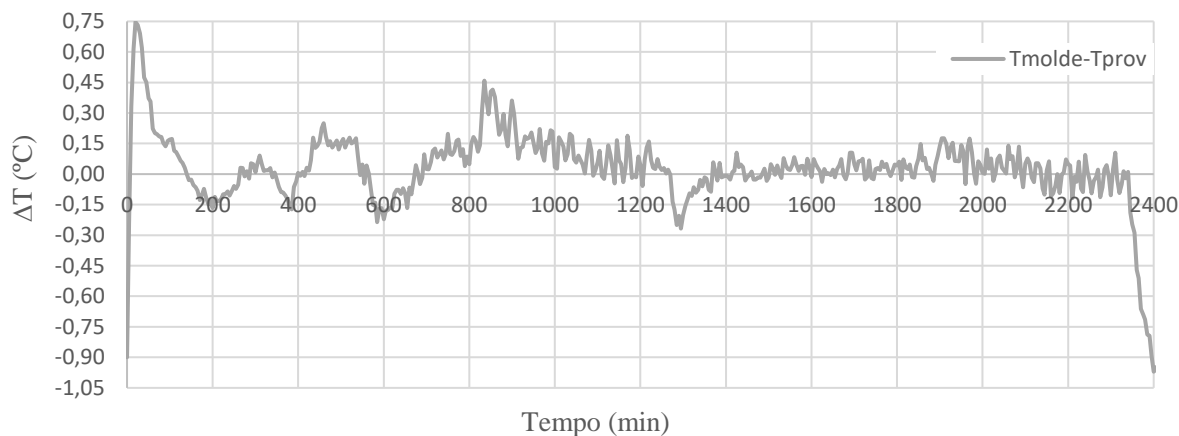


Gráfico 4.27 - Diferenças de temperaturas ΔT . Mistura 6.

No Gráfico 4.28 apresenta-se a média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Observa-se que a partir de $t=235\text{min}$, ΔT_{ma} mantém-se no intervalo $0^{\circ}\text{C} - +0,10^{\circ}\text{C}$, pelo que se admite que se recriou com sucesso as condições de fronteira de um maciço infinito.

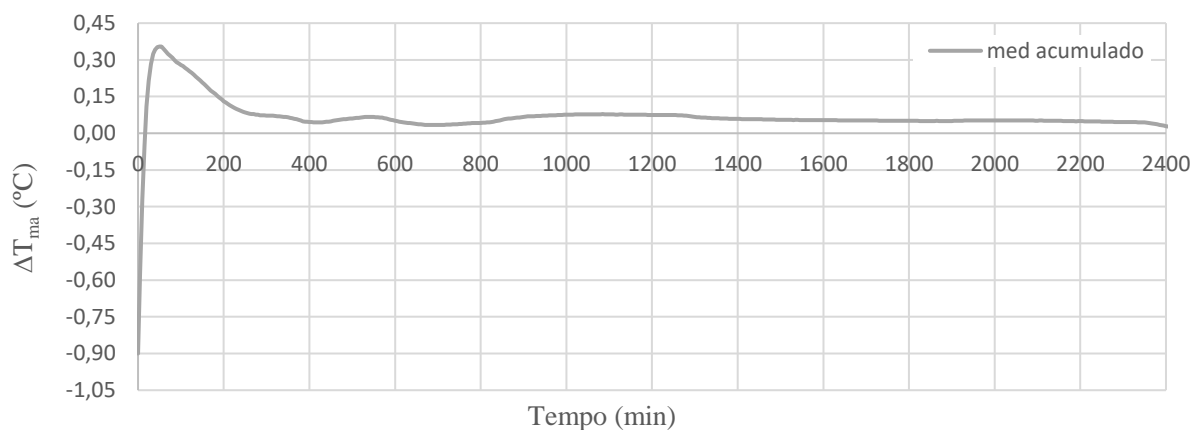


Gráfico 4.28 – Média acumulada das diferenças de temperatura ΔT_{ma} . Mistura 6.

Nos Gráficos 4.29 e 4.30 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão para a tensão resistente dos provetes.

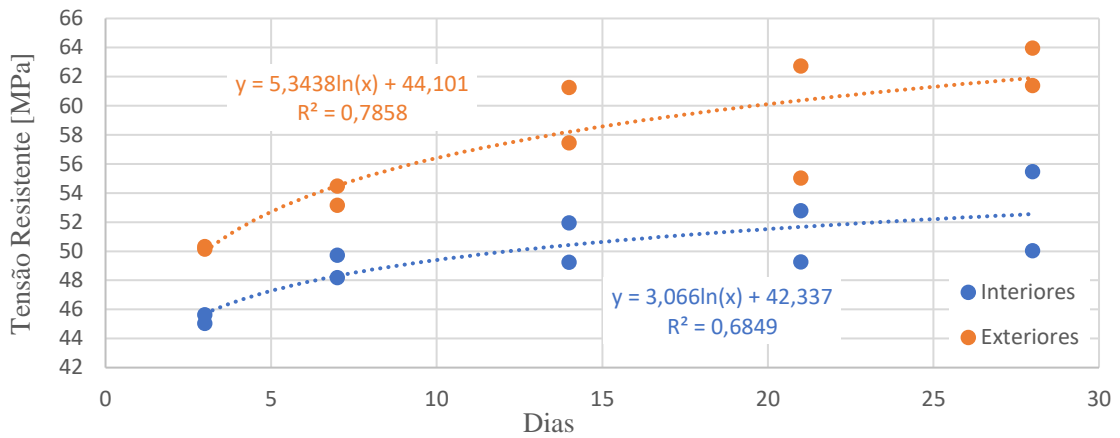


Gráfico 4.29 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Mistura 6.

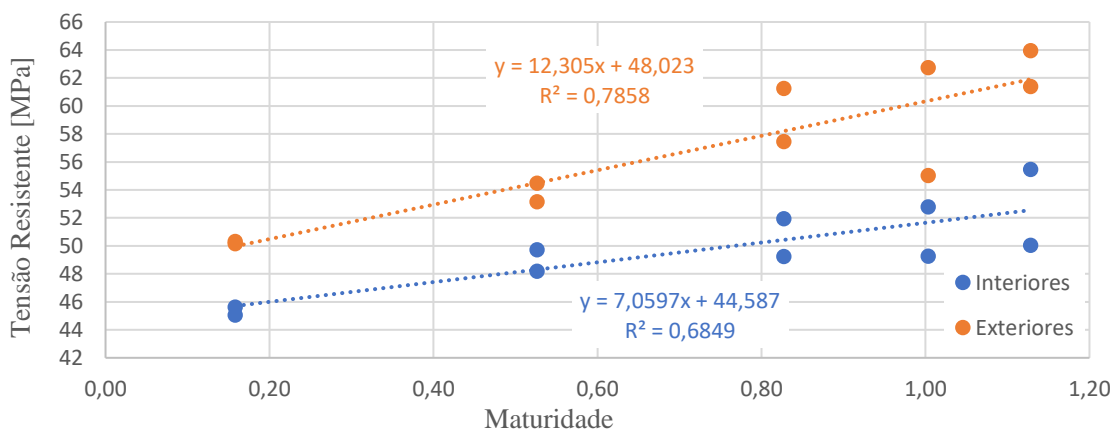


Gráfico 4.30 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Mistura 6.

Verifica-se uma característica semelhante ao caso anterior, relativamente aos exteriores, os provetes interiores iniciam com resistência inferior, e não crescem tanto ao longo do tempo. De qualquer modo, observa-se neste caso que a dispersão dos resultados é superior nos provetes interiores. Relativamente à resistência, esta apresenta um maior crescimento, bem como um valor inicial superior, nos provetes exteriores. Tendo como base as linhas de tendência, a tensão resistente à compressão estimada, no primeiro dia, para os provetes interiores é cerca de 1,8MPa (~4%) inferior. Para $t=28d$, estimou-se um valor da tensão resistente à compressão para os provetes interiores de 52,6MPa, e de 61,9MPa para os exteriores; isto é, uma diferença de 15,1MPa (~15%). Por último, as temperaturas interiores e ambiente divergiram cerca de 66°C.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será feita uma análise mais elaborada de alguns resultados obtidos pelo trabalho elaborado. Em primeiro lugar serão comparadas as curvas de temperatura dos provetes das misturas realizadas. Em segundo lugar tentar-se-á perceber qual o impacto na temperatura do provete devido às diferenças de temperatura para o molde. De seguida serão comparadas as resistências dos provetes exteriores e interiores, entre as misturas.

5.2 Evolução da Temperatura dos Provetes Interiores

Nos dias de execução das misturas, verificaram-se diferentes valores para as temperaturas ambiente, razão pela qual se registaram valores iniciais da temperatura dos provetes diferentes de mistura para mistura. Assim, para efeitos de comparação das curvas de temperatura, às temperaturas registadas nos provetes interiores subtraiu-se o valor inicial da temperatura. O resultado, designado por Temperatura relativa registada dos provetes é o apresentado no Gráfico 5.1, para cada uma das misturas.

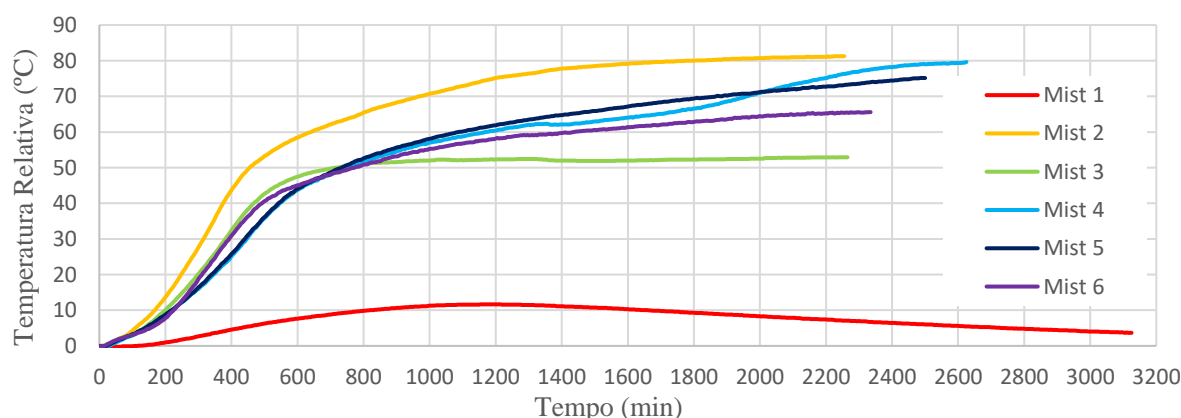


Gráfico 5.1 – Evolução das Temperaturas relativas registadas dos Provetes Interiores.

Na Tabela 5.1 relembram-se alguns valores indicados no Capítulo 4: as colunas “*Ganhos*” representam os ganhos numa 1ª fase de crescimento mais elevado, “*Taxa*” indica a maior taxa de evolução da temperatura relativa do provete, “ T_0 ” representa a temperatura inicial do provete

e “ T_{max} ” corresponde à temperatura máxima registada no provete. Devido ao ajuste referido anteriormente apresenta-se ainda a temperatura relativa máxima ΔT_{max} , obtida através da diferença entre T_{max} e T_0 .

Tabela 5.1 – Resumo de resultados característicos das misturas.

Misturas	Ganhos	Ganhos [°C/h]	Taxa [°C/10min]	T_{max} [°C]	T_0 [°C]	ΔT_{max} [°C]
1	11,9°C/20h	0,595	0,2	31,6	20	11,6
2	49,5°C/7,5h	6,6	1,8	101,5	20,3	81,2
3	42,6°C/8h	5,33	1,4	74,6	21,7	52,9
4	39,7°C/9h	4,41	1,4	102,6	22	80,6
5	38,9°C/8,5h	4,57	1,3	96,9	21,6	75,3
6	35,8°C/6h	5,97	1,6	92	26,5	65,5

De recordar que no interior da estufa encontravam-se 13 provetes em moldes metálicos. O calor libertado pelos provetes foi utilizado essencialmente para aquecimento dos moldes e do interior da estufa. No Gráfico 5.1 é evidente a diferença significativa na evolução da temperatura entre as situações respetivas a um maciço infinito, traduzidas pelas misturas 2 a 6 e a situação de um elemento que consiga dispersar parcialmente o seu calor para o ambiente exterior, traduzido pela mistura 1. Visível em ΔT_{max} obtendo-se uma gama de 65-81°C (com exceção da Mistura 3). Ou seja, desenvolveram-se gradientes de temperatura significativos. As situações respetivas a um maciço infinito geraram temperaturas relativas máximas cerca de 60-70°C superiores à situação traduzida pela Mistura 1 (com exceção da Mistura 3, onde se registou 43°C de diferença).

Outro aspeto evidente consiste no diferente comportamento da mistura 2, na qual a temperatura se manteve sempre acima de todas as restantes misturas. Para além disso, foi a mistura onde se atingiu o maior ΔT_{max} , com maiores “*ganhos*” e uma taxa superior.

Tal como referido anteriormente, os termopares no centro do provete de controlo da Mistura 3 desviaram-se da posição pretendida. Numa 1ª fase de aquecimento a geração de calor no provete foi suficiente para se acompanhar com a estufa tal como descrito no procedimento experimental. Resultando num início similar às restantes misturas. No entanto nessa nova posição dos termopares a temperatura era inferior relativamente ao centro do provete. Com a redução da evolução da temperatura resultante da diminuição das reações químicas e com a incorreta medição da temperatura no centro do provete não estava gerada suficiente temperatura na estufa. Resultando no patamar da Mistura 3.

Relativamente às restantes misturas, 4, 5 e 6, nota-se um comportamento similar durante boa parte do ensaio. No final são evidentes algumas diferenças próximas de 15°C.

No Gráfico 5.2 indica-se a evolução das temperaturas relativas registadas das misturas compostas apenas por cimento e areia da presente dissertação (Misturas 2, 3 e 4) e das misturas realizadas por Longo (2016), *Pan20141104* e *Pan20141106*.

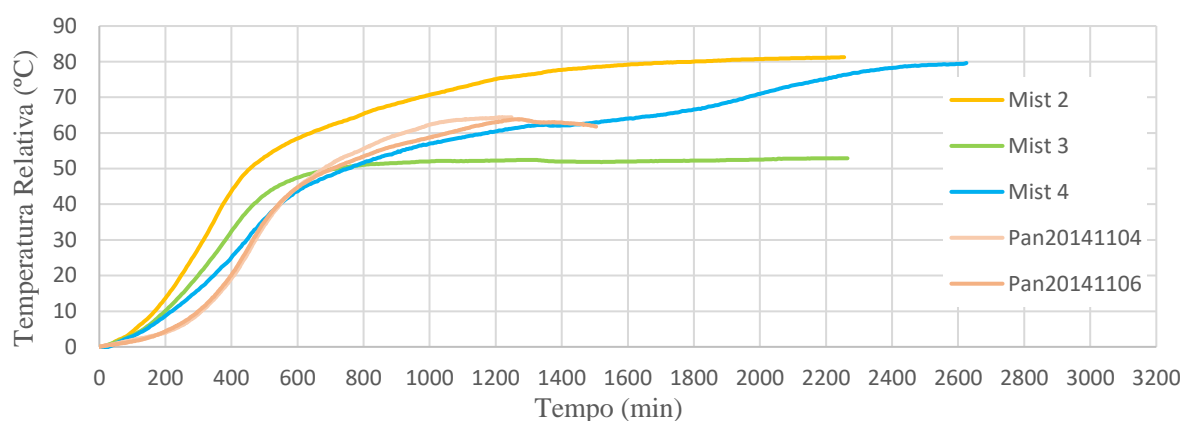


Gráfico 5.2 – Evolução das Temperaturas relativas registadas. Misturas 2, 3 e 4. Misturas *Pan20141104* e *Pan20141106* (Longo, 2016).

As misturas *Pan20141104* e *Pan20141106* são compostas por um traço, cimento:areia:água, em peso de 1:2,5:0,53, tendo sido utilizado o cimento *CEM II/A-L 42,5R*, tal como referido no Capítulo 2. As temperaturas de início de *Pan20141104* e *Pan20141106* foram 22,35°C e 22°C respetivamente. O início da evolução da temperatura foi mais lento para as misturas de Longo que para as misturas da presente dissertação. No entanto as misturas de Longo terminaram com gradientes de temperatura similares à mistura 4. Combinando com uma fase de crescimento mais curta resulta em ganhos de temperatura superiores que os obtidos na presente dissertação, na ordem dos 7,9°C/h para *Pan20141105*.

5.3 Impactos na temperatura do provete devido a ΔT

Neste ponto pretende-se analisar os impactos na evolução da temperatura no provete de controlo devidos às diferenças entre o molde e o provete de controlo. Por impactos entende-se a temperatura fornecida ou retirada ao provete de controlo para uma diferença de temperaturas entre o molde e o provete de controlo.

Para o efeito realizou-se um ensaio na segunda-feira dia 8 de maio de 2017, quatro dias após a realização da mistura 4, onde se colocou o provete de controlo e o respetivo molde de controlo da mistura 4 dentro da estufa. A temperatura máxima alcançada pelo provete de controlo foi de

102°C. Na fase de aquecimento o tempo em que estufa estava ligada foi sendo aumentado de forma incremental de modo a não exceder as temperaturas máximas registadas no provete (cerca de 100°C). O arrefecimento decorreu com a estufa desligada. No Gráfico 5.3 apresentam-se as temperaturas registadas no provete e no molde de controlo da Mistura 4 durante este ensaio.

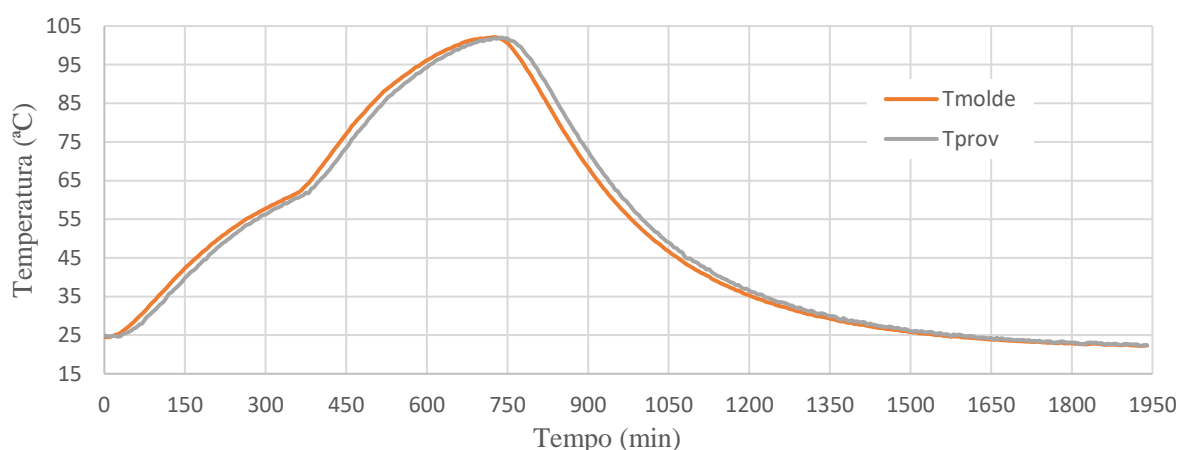


Gráfico 5.3 – Temperaturas registadas no provete e molde de controlo da Mistura 4 durante o ensaio.

De seguida admitiu-se que o impacto, designado por ΔT_{prov} , provocado no provete devido às diferenças de temperatura ΔT entre o molde e o provete, num intervalo de 5min, seria proporcional a ΔT médio no intervalo, conforme indicado na Equação 5.1.

$$\Delta T_{prov} = k * \Delta T_{médio} = k * (T_{molde} - T_{prov})_{médio} \quad (5.1)$$

No Gráfico 5.4 estão representados os resultados experimentais num gráfico de abcissas ΔT e ordenadas ΔT_{prov} . A equação da linha de tendência linear permite conhecer facilmente a constante de proporcionalidade, designada por k .

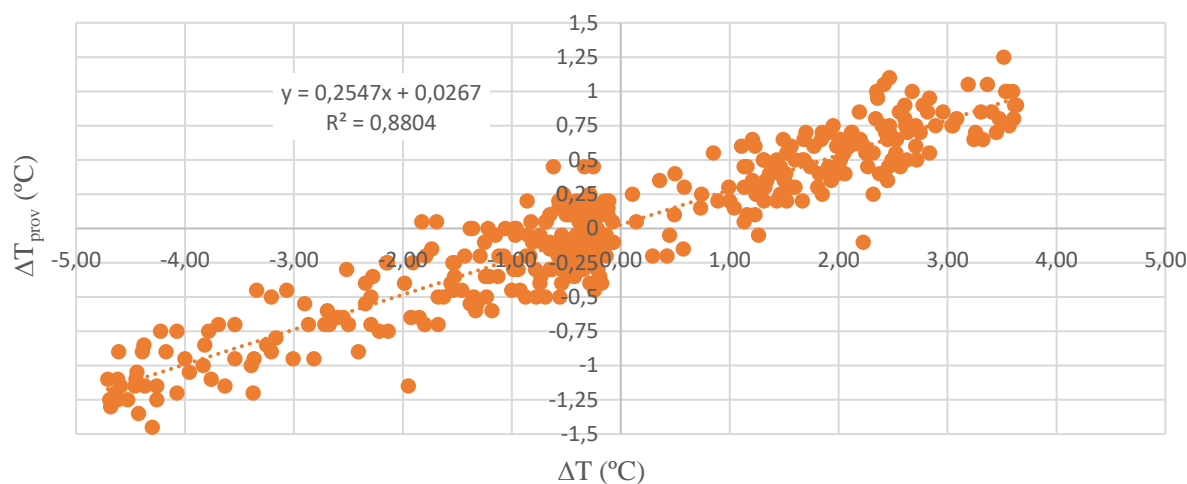


Gráfico 5.4 – Constante de proporcionalidade k entre ΔT_{prov} e ΔT .

Conclui-se que a constante de proporcionalidade k assume um valor aproximado de 0,255. Ou seja, se a temperatura do molde for 1°C superior à temperatura do provete durante 5min, este aquecerá 0,255°C. Com base neste coeficiente é possível estimar a temperatura efetiva do provete $T_{prov,ef}$ se o ensaio tivesse decorrido em condições adiabáticas, isto é, $\Delta T=0$. Para se obter $T_{prov,ef}$ num dado instante bastará somar à temperatura do provete T_{prov} , nesse mesmo instante, o somatório dos impactos ΔT_{prov} até ao instante pretendido, tal como indicado na Equação 5.2.

$$T_{prov,ef}^n = T_{prov}^n + \sum_{i=1}^n k * (T_{molde} - T_{prov})_{médio} \quad (5.2)$$

Da aplicação da Equação 5.2 obtém-se as temperaturas corrigidas/efetivas de cada provete de controlo das misturas executadas, para $\Delta T=0$, correspondendo por isso a uma situação cuja realização da cura decorresse em condições “totalmente” adiabáticas. Estas encontram-se indicadas nos Gráficos 5.5 a 5.9, para as Misturas 1 a 6 com a exceção da Mistura 3, bem como as temperaturas do provete registadas durante o ensaio.

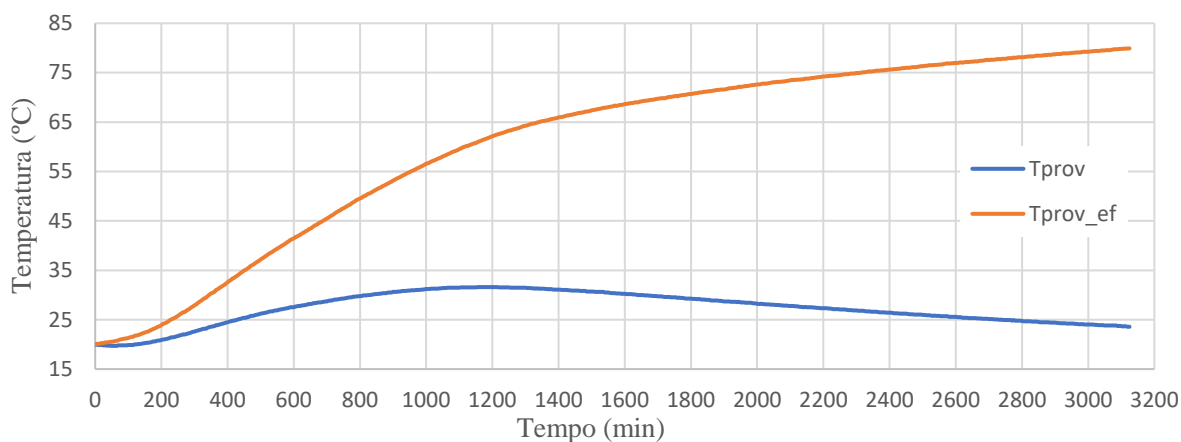


Gráfico 5.5 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 1.

Para a Mistura 1, onde não se operou a estufa, tendo os provetes apenas sido colocados no interior da estufa e a mesma fechada, a temperatura registada máxima atingida no provete de controlo foi cerca de 12°C superior à temperatura inicial. No entanto, como é visível no Capítulo 4 existiram diferenças de temperatura entre o molde e o provete. Aplicando a Equação 5.2 obter-se-ia uma temperatura máxima do provete no final do ensaio de cerca de 80°C.

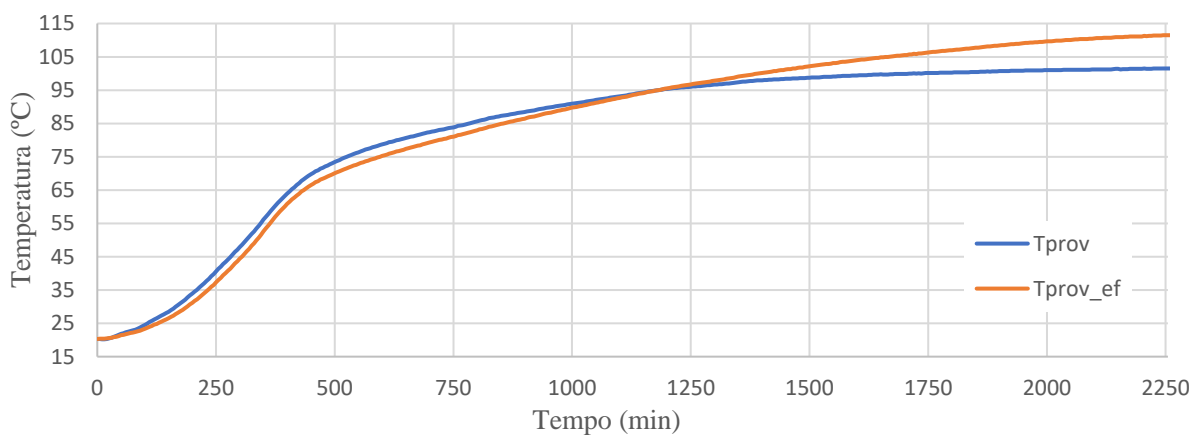


Gráfico 5.6 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 2.

Para os provetes interiores da Mistura 2, até $t=1175\text{min}$ (cerca de 19,5h) devido às diferenças de temperatura para o molde, este acabou por fornecer energia ao provete. Após esse instante foi sendo retirada temperatura aos provetes. No término da operação da estufa, $t=2255\text{min}$ (cerca de 37,5h) estima-se $T_{prov,ef}=111,5^{\circ}\text{C}$ e registou-se $T_{prov}=101,5^{\circ}\text{C}$; correspondendo a uma diferença de 10°C.

Na Mistura 3 devido ao sucedido com os termopares, explicado anteriormente, a temperatura registada é inferior à real temperatura do centro do provete. Adicionalmente, durante quase todo o ensaio a temperatura do molde foi superior à do provete conforme se verifica no Gráfico 4.12. Pela metodologia de cálculo da temperatura efetiva no provete indicada nesta secção, $T_{prov, ef}$ seria inferior a T_{prov} . Tal seria afastar-se ainda mais da realidade, pelo que não se indica o cálculo da temperatura efetiva do provete para a Mistura 3.

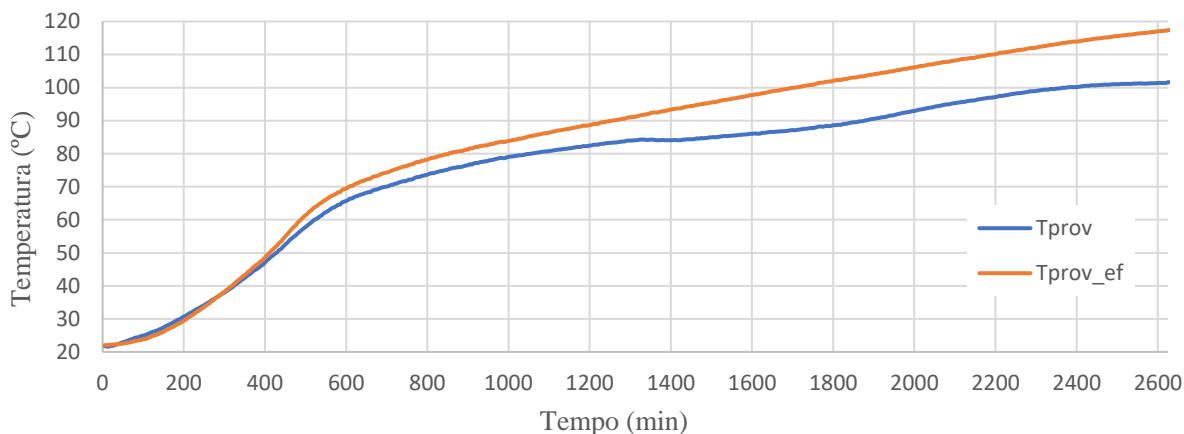


Gráfico 5.7 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 4.

Nos provetes interiores da Mistura 4, a cura decorreu em condições quase adiabáticas até $t=430\text{min}$ (cerca de 7h). No entanto, após esse instante conclui-se que foi sendo retirada temperatura ao provete. No final, para $t=2625\text{min}$, estima-se $T_{prov, ef}=117,4^{\circ}\text{C}$ e registou-se $T_{prov}=101,6^{\circ}\text{C}$, ou seja, $15,8^{\circ}\text{C}$ de diferença.

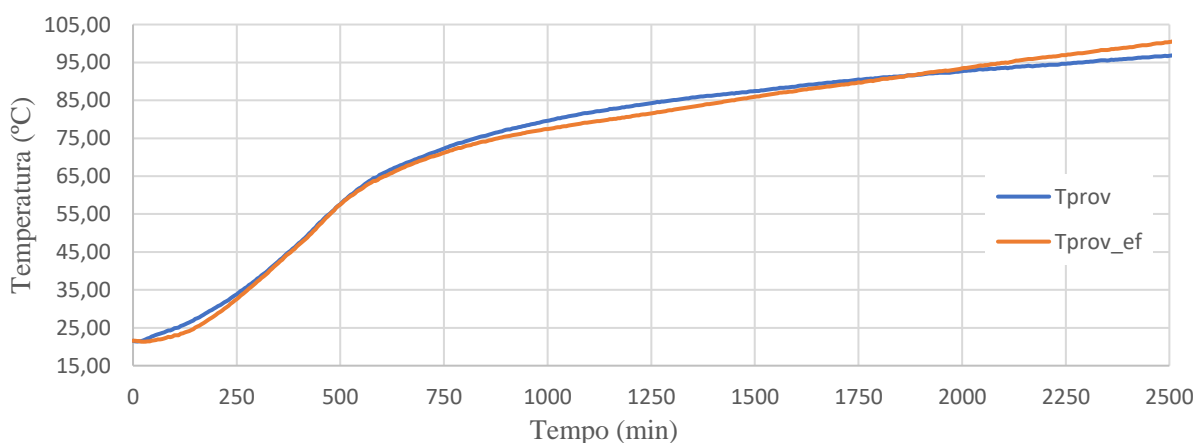


Gráfico 5.8 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 5.

No caso da cura dos provetes interiores da Mistura 5, as condições quase adiabáticas foram mantidas até $t=750\text{min}$ (cerca de 12,5h). Após este instante, forneceu-se temperatura aos provetes até $t=1900\text{min}$ (cerca de 31,5h), momento em que a tendência se inverteu passando a ser retirada temperatura ao provete. No final, para $t=2500\text{min}$, estima-se $T_{prov, ef}=100,4^{\circ}\text{C}$ e registou-se $T_{prov}=96,7^{\circ}\text{C}$, correspondendo a $3,7^{\circ}\text{C}$ de diferença.

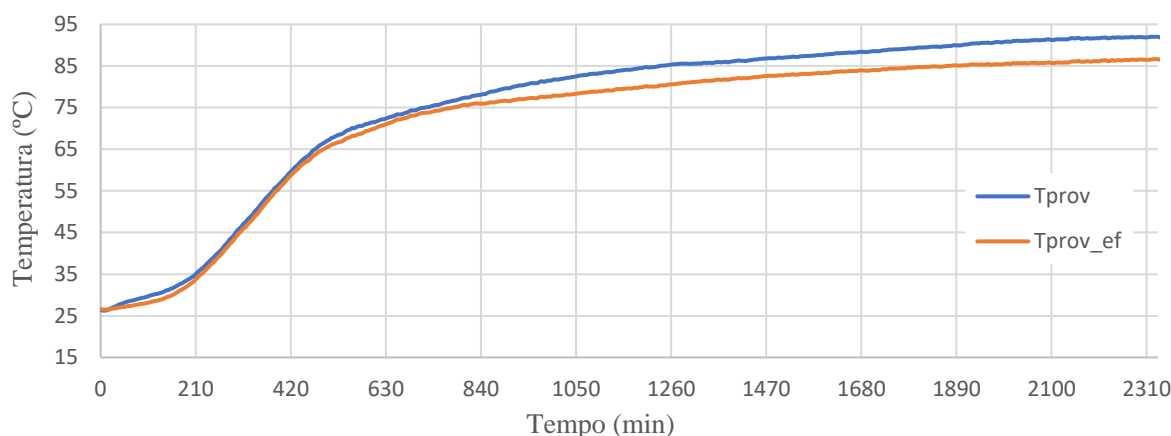


Gráfico 5.9 – Temperaturas registadas e efetivas no provete de controlo. Mistura 6.

Na Mistura 6, a cura dos provetes interiores decorreu em condições quase adiabáticas até $t=775\text{min}$ (cerca de 13h). A partir desse instante e até ao final foi sendo fornecida temperatura aos provetes. No final, para $t=2335\text{min}$ (cerca de 39h), estima-se $T_{prov, ef}=86,6^{\circ}\text{C}$ e registou-se $T_{prov}=92^{\circ}\text{C}$, isto é, uma diferença de $-5,4^{\circ}\text{C}$.

Por último e para comparar a evolução das temperaturas efetivas dos provetes de controlos das misturas realizadas calcularam-se temperaturas relativas, tal como no ponto 5.2. O resultado é o indicado no Gráfico 5.10.

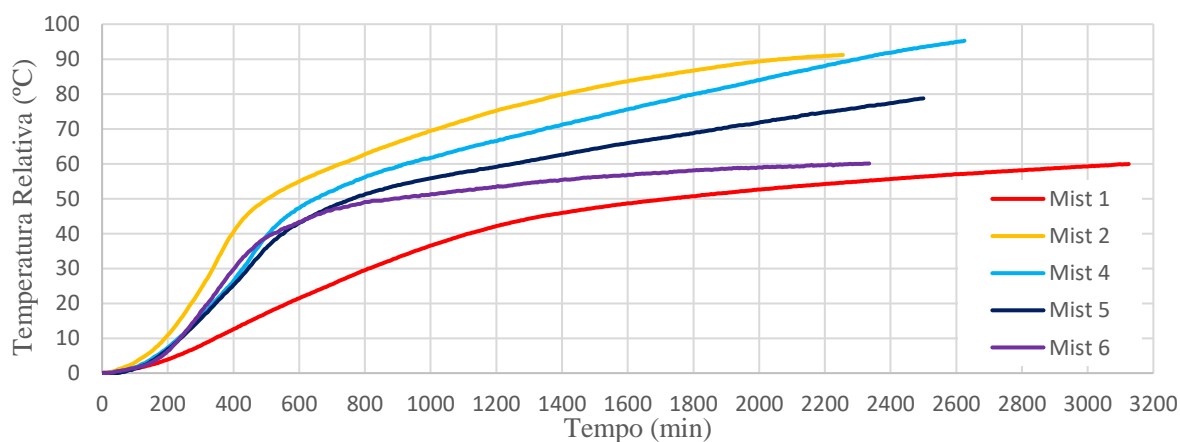


Gráfico 5.10 – Temperaturas efetivas relativas do provete de controlo.

Observa-se que não havendo perdas entre a estufa e o exterior e entre o molde e o provete, existiria na Mistura 1 um gradiente de temperatura significativo de 60°C equivalente à Mistura 6 no final da cura. Nas misturas compostas por cimento e areia, observa-se que as Misturas 2 e 4 chegaram a valores semelhantes quer no valor da temperatura efetiva do provete quer no valor da temperatura registada do provete, sendo a principal diferença o tempo de cura decorrido. A Mistura 2 atingiu os valores indicados cerca de 6 horas mais cedo do que a Mistura 4, podendo ser uma indicação da melhor qualidade do cimento utilizado na Mistura 2. Observa-se também que a situação de simular um maciço infinito (ensaios das misturas 2 e 4) levou a que a temperatura estimada do provete fosse superior, cerca de 30°C, à situação de deixar os provetes interiores na estufa (Mistura 1), deixando-a fechada e desligada durante a cura. Nas misturas 2 e 4, após correção das temperaturas do provete, verifica-se que a evolução da temperatura se tinha estabilizado. Tal não se verifica para as misturas 4 e 5, existindo ainda uma tendência crescente da evolução da temperatura.

5.4 Tensão resistente à compressão

O principal objetivo desta dissertação é avaliar qual a influência da temperatura de cura na resistência mecânica do betão. Neste ponto serão comparados os resultados obtidos para cada um dos conjuntos de provetes de cada mistura. Nos Gráficos 5.11 e 5.12 representa-se a evolução da tensão resistente de compressão para os provetes exteriores em dias e maturidade de cada mistura, respetivamente.

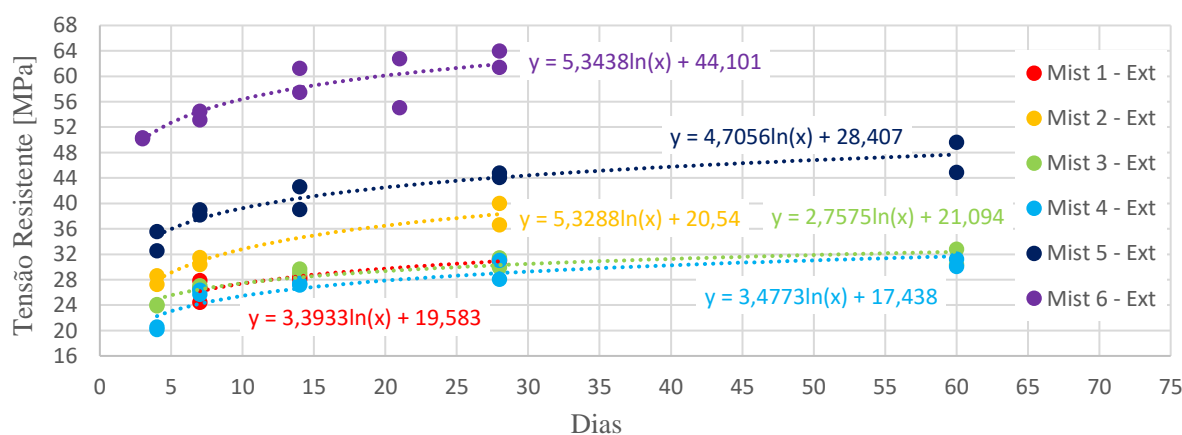


Gráfico 5.11 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Provetes Exteriores.

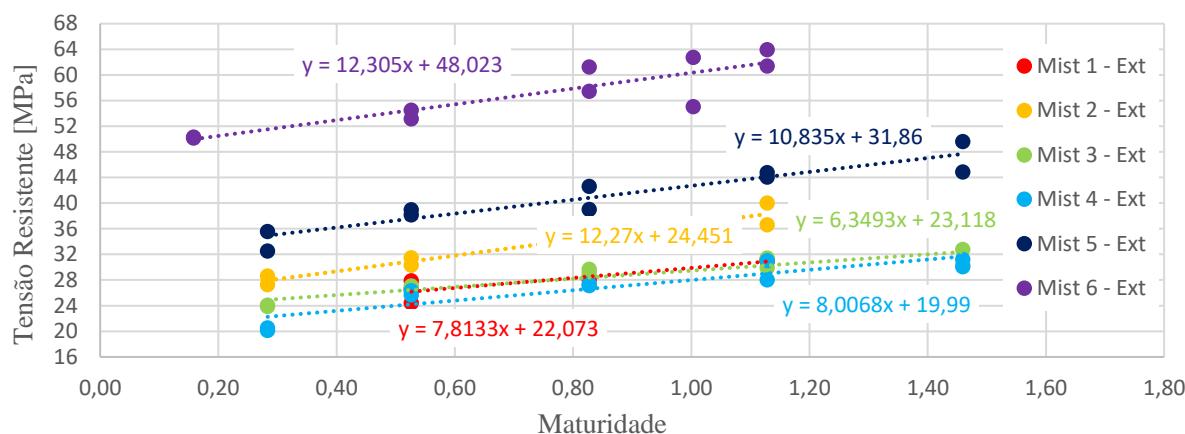


Gráfico 5.12 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Provetes Exteriores.

Na Tabela 5.2 é feito um resumo dos resultados obtidos para os provetes exteriores para cada mistura. Onde σ_{1d} e σ_{28d} representam a tensão resistente á compressão estimada pelas linhas de tendência indicadas ao primeiro e vigésimo oitavo dia de cura respetivamente. $\Delta\sigma$ representa o ganho de resistência entre o primeiro e vigésimo dia.

Tabela 5.2 – Resumo dos resultados dos Provetes Exteriores

Mistura	Provetes Exteriores		$\Delta\sigma$ (%)
	σ_{1d} (MPa)	σ_{28d} (MPa)	$[(\sigma_{28d}/\sigma_{1d}) - 1] * 100$
1	19,6	30,9	57,7
2	20,5	38,3	86,4
3	21,1	30,3	43,6
4	17,4	29,0	66,4
5	28,4	44,1	55,2
6	44,1	61,9	40,4

Nas primeiras 4 misturas, compostas apenas por cimento, areia e água, verificam-se vários aspetos. Em primeiro lugar, nestas misturas, exceto a Mistura 2, existe uma evolução da tensão resistente à compressão semelhante, podendo-se chegar a um valor médio de referência de 30,1MPa. Este valor é próximo, mas 2,4MPa inferior ao valor da tensão resistente à compressão de 32,5MPa indicado na ficha técnica do cimento, tal como referido no Capítulo 3. Importa referir que a Mistura 1 difere das restantes misturas, tendo uma relação água/cimento de 0,50 em vez de 0,47. No entanto, não se nota na resistência à compressão. Nos pontos anteriores, observou-se um comportamento diferente para a Mistura 2, indiciando um cimento de melhor qualidade. Tal se comprova visto que a resistência da Mistura 2 é sempre superior relativamente

às outras misturas de composição semelhante. Para $t=28d$, a Mistura 2 regista um valor cerca de 27% superior ao valor médio de referência das misturas de composição semelhante. Regista também o maior ganho de resistência entre o primeiro e o vigésimo oitavo dia, 86,4% de entre todas as misturas realizadas.

Com a adição de brita na composição da mistura, a Mistura 5 registou valores de resistência à compressão superiores durante todo o período de ensaios quando comparados com as primeiras quatro misturas. Aos vinte e oito dias de idade a tensão resistente de compressão estimada para a Mistura 5 é cerca de 46,5% superior ao valor médio das Misturas 1, 3 e 4 e cerca de 15% superior ao valor estimado para a Mistura 2.

Finalmente, a adição do superplastificante na Mistura 6 levou a que esta registasse os maiores valores para a tensão resistente de compressão de entre todas as misturas. Para $t=28d$, a tensão resistente de compressão da Mistura 6 é aproximadamente o dobro do valor médio das Misturas 1, 3 e 4; e cerca de 40,4% superior ao valor estimado para a Mistura 5. Esta mistura regista o menor ganho de resistência entre $t=1d$ e $t=28d$, 40,4% de entre todas as misturas.

Nos Gráficos 5.13 e 5.14 representa-se a evolução da tensão resistente de compressão para os provetes interiores em dias e maturidade de cada mistura.

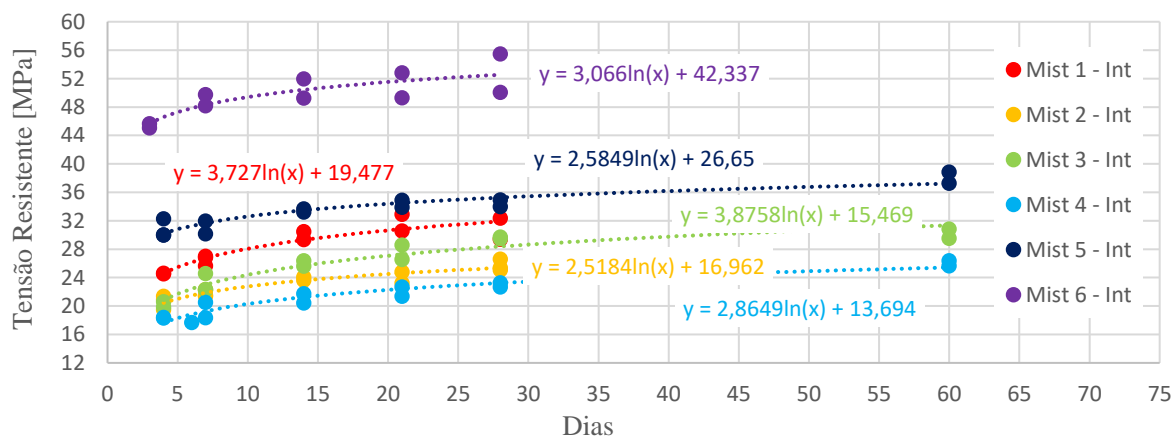


Gráfico 5.13 – Evolução temporal em dias da resistência à compressão. Provetes Interiores.

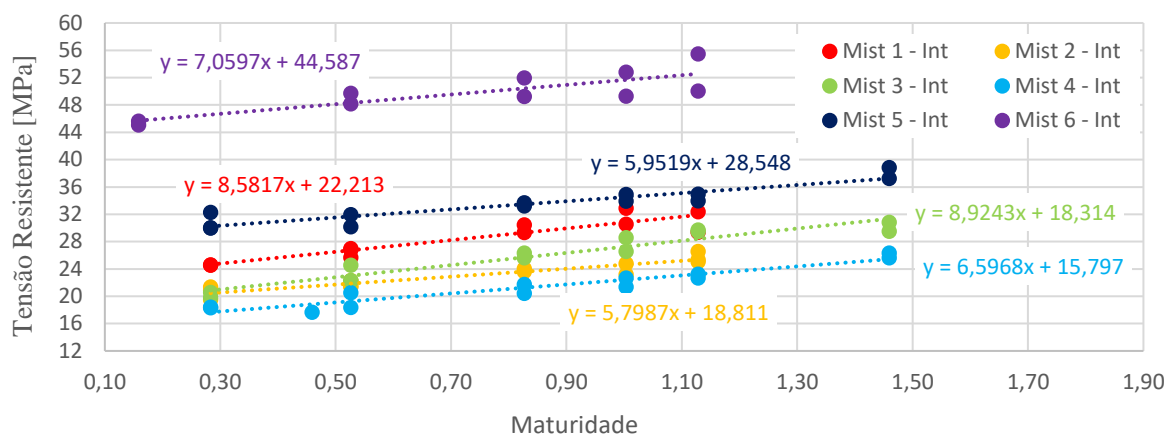


Gráfico 5.14 – Evolução temporal em Maturidade da resistência à compressão. Provetes Interiores.

Na Tabela 5.3 é feito um resumo dos resultados obtidos para os provetes interiores para cada mistura. Para avaliar a influência da temperatura de cura na tensão resistente de compressão considerou-se a coluna “*Varição*” onde se comparam os valores da tensão resistente de compressão estimada dos provetes exteriores e interiores ao primeiro e vigésimo oitavo dias de cura. Valores positivos indicam que a tensão resistente estimada dos provetes interiores é inferior à dos provetes exteriores, enquanto que valores negativos indicam o contrário. T_{max} é a temperatura máxima registada no provete durante a cura.

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados dos Provetes Interiores.

Mistura	Provetes Interiores		$\Delta\sigma$ (%) [[$(\sigma_{28d}/\sigma_{1d}) - 1$] * 100]	Varição (%): [1 - ($\sigma_{int}/\sigma_{ext}$)] * 100		T_{max} (°C)
	σ_{1d} (MPa)	σ_{28d} (MPa)		t=1d	t=28d	
1	19,5	31,9	63,8	0,5	-3,3	31,6
2	17,0	25,4	49,5	17,4	33,8	101,5
3	15,5	28,4	83,5	26,7	6,3	74,6
4	13,7	23,2	69,7	21,5	19,9	101,6
5	26,7	35,3	32,3	6,2	20,0	96,9
6	42,3	52,6	24,1	4,0	15,1	92

Numa 1ª observação constata-se que, nas misturas onde se simulou uma cura em condições similares a um maciço infinito (Misturas 2 a 6) houve uma redução da tensão resistente em compressão quer a curto prazo (t=1d) quer a longo prazo (t=28d). Na Mistura 1 a variação da resistência a curto prazo é desprezável. Sendo que aos 28 dias a resistência nos provetes interiores é cerca de 1MPa superior que nos exteriores.

Para as primeiras 4 misturas, contrariamente ao observado nos provetes exteriores, é visível uma diferença na resistência à compressão. Para os provetes interiores a Mistura 1 é a mais resistente. As Misturas 2 e 4, onde se registou uma maior temperatura no provete, cerca de 102°C, registam as menores resistências de entre todas as misturas realizadas. Apesar da melhor qualidade do cimento utilizado na Mistura 2, observável na cura em condições ambientais, as suas características levaram a que a redução na resistência de compressão fosse a mais baixa de entre as misturas compostas por cimento, areia e água. Mas aos 28 dias essa redução foi a maior registada de entre todas as misturas, de 33,8%. A Mistura 4 manteve-se como a mistura menos resistente registando uma redução de resistência média de 20,7% entre os 1 e 28 dias. Na Mistura 3, onde se registou a temperatura no provete mais baixa das misturas curadas dentro da estufa, obteve-se a maior redução de resistência ao primeiro dia de cura, de 26,7%. No entanto aos 28 dias regista a menor redução de entre todas as misturas, cerca de 6,3%.

A adição de brita e superplastificante nas duas últimas misturas diminuíram a redução de resistência a curto prazo. Registando-se o menor valor da redução de resistência de entre todas as misturas, de 4%, para a Mistura 6. No entanto, aos 28 dias de idade a redução de resistência assume valores significativos, 20 e 15,1% para as Misturas 5 e 6 respetivamente. Para um valor médio de resistência aos 28 dias para as misturas compostas apenas por cimento, areia e água de 27,2MPa, a tensão resistente de compressão na Mistura 5 é cerca de 30% superior e na Mistura 6 cerca de 1,9 vezes. Ou seja, aproximadamente menos 16,5 e 10% que os registados nos provetes exteriores.

Quanto aos ganhos de resistência entre $t=1d$ e $t=28d$, a Mistura 6 mantém-se com o menor valor registado, de 24,1%. Contrariamente aos provetes exteriores também o ganho da Mistura 5 se encontra abaixo das Misturas 1 a 4, registando-se um valor de 32,3%. Comparando com os ganhos em condições ambientes existe uma redução de 60% na capacidade de evolução da tensão resistente entre o primeiro e vigésimo oitavo dia.

Quanto às primeiras 4 misturas, a Mistura 4 regista $\Delta\sigma$ semelhante entre interiores e exteriores, 69,7 e 66,4% respetivamente. Para a Mistura 1, correspondente ao menor T_{max} , regista-se um valor de 63,8%, um valor 10,6% superior ao obtido em condições ambientais. A Mistura 2 regista o menor valor $\Delta\sigma$ de apenas 49,5%. Finalmente a Mistura 3, de menor valor de T_{max} das misturas curadas dentro da estufa e menor valor de redução da resistência aos 28 dias, regista o maior ganho de resistência entre $t=1d$ e $t=28d$ de 83,5%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Considerações Finais

O objetivo do presente capítulo consiste em apurar as principais conclusões do trabalho apresentado e por último apresentar sugestões de trabalhos a realizar no futuro.

6.2 Conclusões

Terminado o trabalho, pode-se afirmar que os objetivos definidos no Capítulo 1 foram alcançados:

- ❖ Avaliar a influência da temperatura de cura na resistência a compressão do betão;
- ❖ Conhecer o comportamento térmico do betão quando submetido a uma cura em condições adiabáticas semelhantes às de um maciço infinito.

Após a apresentação e análise dos resultados, referem-se de seguida as principais conclusões da presente dissertação.

Numa situação de cura em condições adiabáticas semelhantes a maciços infinitos podem ser gerados gradientes de temperatura significativos. Na presente dissertação obtiveram-se valores numa gama de 50-80°C superiores à temperatura inicial da mistura.

Verifica-se que, de uma forma geral a temperatura de cura tem influência na resistência à compressão do betão. Nas misturas cuja cura decorreu em condições adiabáticas semelhantes às de um maciço infinito, observou-se que a tensão resistente à compressão, a curto e longo prazo, estimada dos provetes interiores é inferior à estimada para os provetes curados em condições ambientais.

A curto prazo, para as misturas compostas por cimento, areia e água registou-se uma redução da tensão resistente de compressão média de cerca de 22%. No entanto, a introdução de brita e

superplastificante na mistura diminuiu consideravelmente esta redução para valores de 4 a 6% aproximadamente.

A longo prazo registaram-se reduções da ordem dos 20%, com exceção da Mistura 2 que registou a maior redução de resistência entre todas as misturas de 33,8%. Neste caso a introdução de brita não teve o mesmo efeito que a curto prazo. Já a adição do superplastificante diminuiu a redução da resistência para 15,1%, no entanto permanece um valor significativo.

6.3 Trabalhos futuros

Concluído este trabalho exploratório existem alguns aspetos que podem ser investigados em maior detalhe em futuros trabalhos. De seguida são sugeridos alguns exemplos:

- ❖ Melhorar o procedimento de realização dos provetes, reduzindo o intervalo de tempo entre a realização da mistura e sua colocação nos moldes e a colocação destes na estufa, temperatura inicial, etc;
- ❖ Aumentar o número de provetes, exteriores e interiores, de modo a se poder obter um melhor conhecimento da evolução da tensão resistente à compressão do betão;
- ❖ Investigar a influência da temperatura de cura noutras propriedades mecânicas do betão (módulo de elasticidade, etc.);
- ❖ Considerar outras dosagens e tipos de cimento;
- ❖ Considerar outras combinações de componentes da mistura e por ventura outros tipos de agregados;
- ❖ Considerar aditivos, testando várias dosagens correntes, que possam mitigar de algum modo a redução de resistência mecânica observada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Appleton, J. (2013). "Estruturas de Betão". Edições Orion, Amadora.

Fan, L., Zhang, Z., Yu, Y., Li, P., Cosgrove, T. (2017). "Effect of elevated curing temperature on ceramsite concrete performance". *Construction and Building Materials*. Vol. 153, pp. 423-429.

Ha, J., Jung, Y., Cho, Y. (2014). "Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system". *Automation in Construction*. Vol 45, pp. 16-24.

Haque, M. A., Bhowmik, S., Jahin, M. F. (2018). "Assessment of curing temperatures to early predict the 28-day mechanical properties for recycle aggregate mixed concrete production". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 174, pp. 1444-1463.

Hiremath, P. N., Yaragal, S. C. (2017). "Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete". *Construction and Building Materials*. Vol. 154, pp. 72-87.

Kim, J., Han, S. H., Song, Y. C. (2002). "Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results". *Cement and Concrete Research*. Vol. 32, pp. 1087-1094.

Longo, D. F. d. M. (2016). "Análise das Características Térmicas dos Materiais Ativados Alcalinamente". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Nasir, M., Al-Amoudi, O. S. B., Maslehuddin, M. (2017). "Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot water". *Construction and Building Materials*. Vol 152, pp. 943-953.

Neville, A. M. (2004). "Properties of concrete". Pearson Education Limited, Harlow.

Nie, S., Hu, S., Wang, F., Yuan, P., Zhu, Y., Ye, J., Liu, Y. (2016). "Internal curing – A suitable method for improving the performance of heat-cured concrete". *Construction and Building Materials*. Vol. 122, pp. 294-301.

NP EN 12390-3 (2011). “Ensaaios do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão de provetes”, IPQ.

Pichler, Ch., Schmid, M., Traxll, R., Lackner, R. (2017). “Influence of curing temperature dependent microstructure on early-age concrete strength development”. *Cement and Concrete Research*. Vol. 102, pp. 48-59.

The Concrete Portal@ (2017). <http://www.theconcreteportal.com/intro.html>. The Concrete Portal (página internet oficial), Índia.

Uygunoglu, T., Hocaoglu, I. (2018). “Effect of electrical curing application on setting time of concrete with different stress intensity”. *Construction and Building Materials*. Vol. 162, pp. 298-305.

Wang, P., Li, N., Xu, L. (2017). “Hydration evolution and compressive strength of calcium sulphoaluminate cement constantly cured over the temperature range of 0 to 80°C”. *Cement and Concrete Research*. Vol. 100, pp. 203-213.

Wang, X., Park, K. (2017). “Analysis of the compressive strength development of concrete considering the interactions between hydration and drying”. *Cement and Concrete Research*. Vol. 102, pp. 1-15.

Xu, G., Tian, Q., Miao, J., Liu, J. (2017). “Early-age hydration and mechanical properties of high volume slag and fly ash concrete at different curing temperatures”. *Construction and Building Materials*. Vol. 149, pp. 367-377.

Xu, L., Wu, K., Robler, C., Wang, P., Ludwig, H. M. (2017). “Influence of curing temperatures on the hydration of calcium aluminate cement/Portland cement/calcium sulfate blends”. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 80, pp. 298-306.

Xue, B., Pei, J., Sheng, Y., Li, R. (2015). “Effect of curing compounds on the properties and microstructure of cement concretes”. *Construction and Building Materials*. Vol. 101, pp. 410-416.

Zhao, Q., Liu, X., Jiang, J. (2015). “Effect of curing temperature on creep behavior of fly ash concrete”. *Construction and Building Materials*. Vol. 96, pp. 326-333.