



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

Avaliação da Maturidade em Betões Auto-Compactáveis de Elevado Desempenho

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Construções

Autor

Francisco Miguel Ferreira Mendes

Orientadores

Prof. Doutor Fernando José Forte Garrido Branco

Prof. Doutor Hugo Sérgio Sousa Costa

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Quero em primeiro, agradecer toda a iniciativa, rigor, apoio e total disponibilidade que o Prof. Doutor Fernando G. Branco e o Prof. Doutor Hugo Costa me prestaram, foram inextinguíveis. Estou inteiramente grato por tudo o que me ajudaram, do início ao fim do trabalho.

Quero agradecer ao Departamento de Engenharia Civil do ISEC, onde foi realizado todo o trabalho laboratorial, em especial ao técnico António Amaral, que sempre me acompanhou, com disponibilidade e boa vontade.

Agradeço a todos os professores que ao longo destes anos contribuíram na minha formação académica.

Ao técnico José António Lopes, pelo auxílio na parte laboratorial sempre com total disponibilidade e pronto a ajudar.

Em especial expreso o meu agradecimento aos meus pais, irmão e namorada pela ajuda nesta etapa da minha vida. Principalmente ao concluir este trabalho, pelo incentivo e paciência demonstrada.

RESUMO

O betão armado detém devido à sua moldabilidade e à versatilidade de aplicações uma importância fulcral na construção atual. Ao longo do tempo, de modo a ultrapassar vários desafios construtivos, foram desenvolvidos betões específicos através do incremento da resistência e durabilidade, com uso de cimentos de elevado desempenho e através da adição de adjuvantes. Devido ao aumento da racionalização de mão de obra e, também, devido ao aumento da produtividade *in situ*, é de todo o interesse o estudo do betão auto-compactável, uma vez que este dispensa a sua compactação após aplicação. Com um melhor conhecimento do seu fabrico por parte das centrais de produção, o seu uso pode facilmente tornar-se habitual, substituindo o betão corrente num futuro próximo, trazendo benefícios económicos aos agentes envolvidos.

O método da maturidade é uma técnica não destrutiva, que possibilita estimar a resistência real *in situ* do betão, sendo baseado no efeito combinado do tempo e das temperaturas a que os elementos construtivos estão expostos, com resultados fiáveis mesmo para idades mais jovens. O método foi desenvolvido em Inglaterra na década de 50, mas apenas na década de 70 foi utilizado na prática após uma série de acidentes fatais, devido à descofragem prematura. Com a aplicação do método é possível proceder à descofragem de elementos em segurança, pouco tempo após a sua betonagem.

No presente trabalho pretende-se estudar a aplicação do Método da Maturidade em betão auto-compactável de elevado desempenho, com vista à aplicação dos conhecimentos em casos práticos. Foi desenvolvido um programa experimental para calcular os parâmetros fundamentais do método, a *datum temperature*, e a energia de ativação, através do apoio científico da norma ASTM C 1074.

ABSTRACT

Nowadays concrete holds a central role in construction, due to its malleability and versatility. Over time, to overcome a number of constructive challenges, specific concrete formulations have been developed. Increasing strength and durability may be achieved through the use of high-performance cement and the addition of chemical admixtures. The increasing rationalization of skilled manpower and increased demand for in-situ productivity leads to a great interest in the development of self-compacting concrete, since this type of material does not require compaction after application. A better knowledge of its formulation and performance may lead to a more frequent use of self-compacting concrete, eventually replacing the standard concrete in the near future, with economic benefits to the agents involved.

The method of maturity is a non-destructive technique that allows us to estimate the actual in-situ concrete compressive strength, based on the combined effect of elapsed time and temperature to which the concrete elements are exposed. The method presents reliable results even for younger ages. The method was developed in England in the 50s, but was only put in practice in the 70s, after a series of fatal accidents due to premature form removal. With the application of this method it is possible to safely demould concrete elements shortly after concrete pouring.

This work aims at studying the application of the Maturity Method to high performance self-compacting concrete, in order to assess performance knowledge to be implemented in practical situations. An experimental program was developed to calculate the basic parameters of the method, the datum temperature and activation energy, taking into account technical standard ASTM C 1074.

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Enquadramento	11
1.2 Objetivos da dissertação	12
1.3 Estrutura da dissertação	13
2. O MÉTODO DA MATURIDADE	14
2.1 Introdução	14
2.2 Terminologias do método da maturidade	16
2.3 Vantagens e Desvantagens da aplicação do método da maturidade	17
2.4 Norma ASTM C-1074	18
2.4.1 Introdução	18
2.4.2 Determinação da relação maturidade – resistência.....	19
2.4.3 Determinação da <i>datum temperature</i> e da energia aparente de ativação	19
2.4.4 Determinação da resistência <i>in situ</i> do betão.....	22
3. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL	23
3.1 Introdução	23
3.2 Aplicação de BAC	23
3.3 Propriedades do BAC	26
3.3.1 Propriedades do BAC no estado fresco	26
3.3.2 Vantagens, desvantagens e aplicações do BAC	26
3.4 Constituintes do BAC	27
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
4.1 Estudo e caracterização das misturas	29
4.2 Condições de cura	32
4.3 Monitorização e ensaio dos provetes	33
4.3.1 Provetes de Betão	33
4.3.2 Provetes de Argamassa.....	34
4.4 Produção do betão.....	35

5. RESULTADOS	36
5.1 Ensaios com Argamassa	36
5.1.1 Cálculo da <i>Datum Temperature</i> e da energia de ativação	38
5.2 Ensaios com BAC	43
6. CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação da função Nurse-Saul (Nixon et al., 2008)	15
Figura 2.2 - Esquema de aplicação do método de maturidade (Carino e Lew, 2001; adaptado)	18
Figura 3.1 - Ponte Shin-Kiba Ohashi (Okamura et al., 2003)	23
Figura 3.2 - Ancoragem da Ponte Akashi-Kaikyo (Okamura et al, 2003)	24
Figura 3.3 – Produção na Europa no ano 2012, por classe (ERMCO.eu , 2014)	25
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados.....	30
Figura 4.2 - Moldes utilizados: a) Forma Cúbica b) Forma paralelepípedica c) Provetes de argamassa em cura na câmara térmica	30
Figura 4.3 - Condições de Cura: a) Interior da câmara térmica; b) Câmara térmica ; c) Cura em recipiente com água	32
Figura 4.4 - Instalação Laboratorial: a) Datalogger a registar temperaturas de cura;	33
Figura 4.5 - Ensaios de resistência à compressão: a) Prensa Microtest ; b) Ensaio.	34
Figura 4.6 – a) Prensa universal e ensaio de resistência à compressão; b) Ensaio de resistência à compressão de provetes de argamassa.....	35
Figura 4.7 - a) balança ; b) misturadora ; c) moldes e provetes de betão	35
Figura 5.1 - A_60_FC Figura 5.2 - A_60_SF	37
Figura 5.3 - A_100_FC Figura 5.4 - A_100_SF	37
Figura 5.5 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A_60_FC	40
Figura 5.6 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A_60_SF.....	40
Figura 5.7 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A_100_FC.....	40
Figura 5.8 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A_100_SF	40
Figura 5.9 - a) Superfície de rotura típica do betão ; b) Superfície de rotura observada em betão de 100MPa	44
Figura 5.10 - Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão.....	45
Figura 5.11 – Evolução da Maturidade ao longo da idade de cura.	46
Figura 5.12 – Desenvolvimento da Idade Equivalente.....	47
Figura 5.13 - Evolução da Maturidade ao longo da idade de cura, $T_0(B_{100_FC})=T_0(B_{60_FC})$	48
Figura 5.14 – Registo das temperaturas dos provetes de betão	48
Figura 5.15 – Evolução da maturidade no B_60_FC	49
Figura 5.16 – Desenvolvimento da idade equivalente B_60_FC	50
Figura 5.17 – Evolução da maturidade no B_60_SF.....	50
Figura 5.18 - Desenvolvimento da idade equivalente no B_60_SF	50
Figura 5.19 – Evolução da maturidade no B_100_FC	51
Figura 5.20 – Desenvolvimento da idade equivalente no B_100_FC.....	51

Figura 5.21 – Evolução da maturidade no B_100_SF.....	51
Figura 5.22 – Desenvolvimento da idade equivalente B_100_SF	52
Figura 5.23 - Relação Resistência/Maturidade em função do cimento	52
Figura 5.24 - Relação Resistência/Maturidade em função da adição.....	53

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Composição dos betões em estudo	31
Quadro 4.2 - Composição das argamassas em estudo	31
Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios realizados nos provetes de argamassa	36
Quadro 5.2- Determinação da T_0 e da E_a para a A_60_FC	38
Quadro 5.3- Determinação da T_0 e da E_a para a A_60_SF.....	39
Quadro 5.4 - Determinação da T_0 e da E_a para a A_100_FC	39
Quadro 5.5 - Determinação da T_0 e da E_a para a A_100_SF.....	39
Quadro 5.6 – Valores de Q extraídos dos gráficos.....	41
Quadro 5.7 - Datum Temperature (Wade et al (2006) citando Carino e Tank (1992)).....	42
Quadro 5.8 – Relação água-cimento das argamassas	42
Quadro 5.9 - Valores da energia de ativação (Peres et al.,2005).....	43
Quadro 5.10 - Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão.....	44
Quadro 5.11 - Resistências médias dos ensaios à compressão, e respetivos desvios.....	45

SIMBOLOGIA

- s – coeficiente de variação;
- R – constante universal dos gases perfeitos, 8,314 (J/K.mol);
- T_0 – *datum temperature* (°C);
- E_a – energia de ativação (J/mol);
- Q – energia de ativação dividida pela constante universal dos gases perfeitos (K^{-1});
- $M(t)$ – fator temperatura – tempo à idade t (°C-h ou °C-d);
- t – idade de cura do procedimento de ensaios (horas ou dias);
- t_e – idade equivalente a uma temperatura de referência;
- Δt – intervalo de tempo (horas ou dias);
- k – parâmetro constante;
- w/c – relação água-cimento;
- T – temperatura do betão (K).

ABREVIATURAS

- BAC* – betão auto-compactável;
BC – betão corrente;
FC – fíler calcário;
FHP – função Freiesleben, Hansen e Pedersen;
SF – sílica de fumo;
SP – super-plastificante.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O betão é o material de construção mais utilizado para a execução da estrutura de edifícios, tendo grandes vantagens devido à sua moldabilidade e facilidade de produção e aplicação, bem como a grande gama de resistências mecânicas permitidas. O betão começou a ser utilizado no início do séc. XIX, ganhando grande popularidade relativamente aos métodos construtivos da época, mantendo a sua importância graças aos sucessivos avanços tecnológicos na sua produção.

Na execução de uma estrutura de betão, é necessária a preparação de uma estrutura de moldagem temporária, normalmente em madeira ou metálica, com a forma interior que o elemento de betão deverá adquirir e onde a mistura é descarregada de forma cuidada. Esta estrutura auxiliar é denominada de cofragem. Nesta parte do processo, aguarda-se que as reações de presa do betão ocorram, permitindo o ganho de resistência do elemento com a idade. Para tal, são necessários alguns dias de espera até que este resista ao seu próprio peso e mais algum tempo para resistir ao carregamento de serviço.

Com o acelerar da indústria da construção no séc. XX, foi essencial acelerar todas as fases de construção, de modo a conseguir concluir os projetos nos prazos previstos e com lucros significativos. Devido a esta necessidade, a resistência inicial do betão foi algumas vezes desprezada, conduzindo à remoção precoce da cofragem com o objetivo de facilitar a movimentação de operários e materiais na obra, originando o colapso da estrutura, quer no instante imediato, quer posteriormente, aquando da aplicação de cargas.

Com vista a aumentar o conhecimento acerca do desenvolvimento das propriedades mecânicas da estrutura e permitir a remoção das cofragens em segurança, foi desenvolvido o Método da Maturidade, que faz uso da reação exotérmica de hidratação do cimento. Este método baseia-se na temperatura registada no núcleo dos elementos e em função do intervalo de tempo de cura, e permite uma estimativa do desenvolvimento da resistência até à idade pretendida.

O betão auto-compactável (BAC) foi desenvolvido na década de 80 por cientistas japoneses com o objetivo de dispensar a vibração aquando da colocação do betão, uma tarefa que se mostrava morosa devido às densas armaduras utilizadas para fazer face a uma região altamente sísmica. Este tipo de betão consegue preencher por completo a cofragem, pela eliminação automática dos vazios porosos, aumentando a homogeneidade de resistência e cor do betão, permitindo diminuir a mão de obra e aumentar a durabilidade (Skarendahl *et al.*, 2000).

Ao empregar as ferramentas e equipamento necessário ao processo de vibração devem referir-se os malefícios de saúde gerados para os operários, nomeadamente doenças da estrutura óssea e perda da qualidade de audição.

A estimativa pelo Método da Maturidade, apesar de não se tratar de um processo com equipamento de elevado custo, é apenas utilizada em construções muito exigentes do ponto de visto técnico, onde qualquer ganho de tempo no cronograma de tarefas é importante, o mesmo tipo de construções onde poderá ser aplicado BAC. Assim, é de todo o interesse conjugar estes dois avanços construtivos, de modo a aumentar o conhecimento existente. O desenvolvimento da resistência do BAC é de extrema importância uma vez que este tem maior sensibilidade à temperatura (Zhang *et al.*, 2008).

1.2 Objetivos da dissertação

Pretende-se estudar o desenvolvimento de resistência do betão auto-compactável de elevado desempenho, através da análise dos seguintes e principais objetivos:

- Aplicação do método da maturidade, registando as temperaturas no interior dos provetes de betão;
- Compreender como a adição de sílica de fumo altera a resistência mecânica;
- Estudar a evolução da resistência à compressão nas misturas;
- Aplicar o método da maturidade nas matrizes de argamassa das misturas para diferentes temperaturas.

1.3 Estrutura da dissertação

No 1º capítulo pretende-se contextualizar o tema através da introdução, apresentar os objetivos propostos e a estrutura da Tese de Dissertação.

No 2º capítulo descreve-se em pormenor o método da maturidade, o processo envolvido, os benefícios e limitações, a precisão envolvida e o rigor. No final deste capítulo é descrito o procedimento experimental.

Com o 3º capítulo, dedicado ao BAC, são referidas algumas das construções onde foi utilizado, os parâmetros da sua composição, os benefícios e limitações do seu uso.

No 4º capítulo é apresentado o programa experimental, onde são descritos os betões e argamassas utilizados, as suas dosagens, os equipamentos empregados para a betonagem e para a monitorização das temperaturas, e condições de cura.

A discussão dos resultados experimentais, com a análise dos valores de resistência calculados pelo método da maturidade e os valores obtidos nos ensaios de compressão, são apresentados no 5º capítulo.

No 6º capítulo apresentam-se as principais conclusões.

2. O MÉTODO DA MATURIDADE

2.1 Introdução

As bases para o desenvolvimento do método da maturidade foram lançadas em 1949, quando McIntosh, através de uma série de experiências, tentou acelerar o processo de cura de elementos de betão, com recurso a um circuito elétrico. Este sugeriu que “*o produto entre o tempo e a temperatura do betão, para valores superiores à datum temperature, poderiam descrever os efeitos da cura*”, assumindo a *datum temperature* como -1,1 °C. Contudo, McIntosh concluiu que o ganho da resistência não estava apenas dependente destes fatores (Malhotra *et al.*, 2004).

Pouco tempo após a publicação deste trabalho, Nurse (1949) (citado por Carino *et al.*, 2001) mostrou, em câmaras de cura a vapor, como é que o endurecimento estaria relacionado com a temperatura, sendo esta a primeira demonstração do método.

Com base nos trabalhos anteriores, Saul (1951) resumiu que “*a lei do acréscimo de resistência se dá com a maturidade*” e “*um betão com o mesmo índice de maturidade tem aproximadamente a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de tempo e temperaturas experimentadas pela mistura para atingir o mesmo índice de maturidade*”. Com Kim *et al.*, (2001) foi pela primeira vez utilizado a designação método da maturidade, tendo este sugerido a variação do valor da *datum temperature* em função dos constituintes do betão.

O índice de maturidade $M(t)$ foi a partir daí calculado com a expressão que viria a ser conhecida pela função Nurse-Saul (1):

$$M(t) = \sum_0^t (T_a - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Sendo T_a a temperatura média do betão, T_0 a temperatura de referência ou *datum temperature* e Δt o intervalo de tempo de cura do betão.

Refere-se que a *datum temperature* representa o limite de temperatura abaixo da qual não ocorre ganho de resistência, ou seja, é o limite de temperatura abaixo da qual não ocorre aumento da maturidade do betão. A norma ASTM C 1074 (2004) indica que este parâmetro pode tomar o valor de 0°C.

A função Nurse-Saul consiste na soma, ao longo de um período de tempo de análise, dos produtos entre as diferenças das temperaturas médias registadas em iguais intervalos de tempo e a temperatura de referência, pelos intervalos de tempo considerados. Esta não representa de forma correta o efeito da temperatura na cura do betão, principalmente para as idades iniciais, já que não tem uma relação direta com os processos reais físicos e químicos da hidratação do cimento (Nixon *et al.*, 2008). Um esquema da função pode ser observado na Figura 2.1.

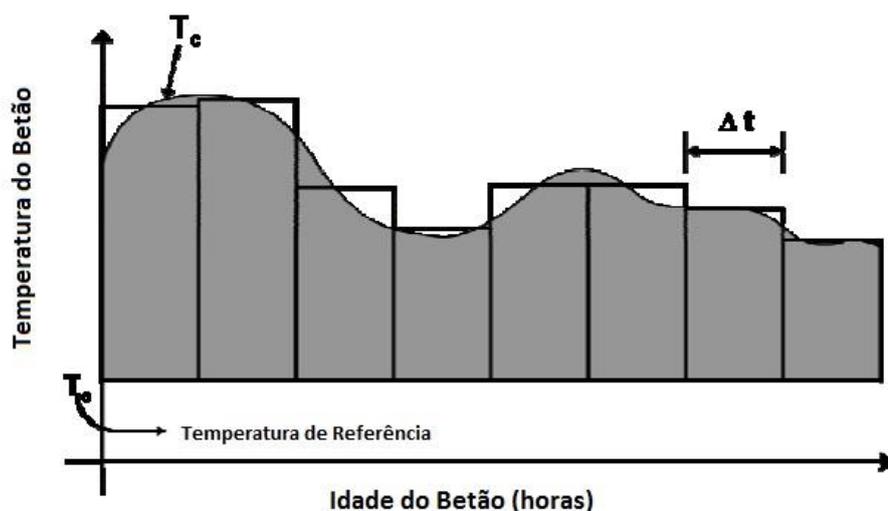


Figura 2.1 - Representação da função Nurse-Saul (Nixon et al., 2008)

Em 1960, Copeland sugeriu que os efeitos da temperatura nas idades iniciais de hidratação do betão poderiam ser descritos pela equação de Arrhenius. No ano de 1977, Freiesleben Hansen e Pedersen, basearam-se na equação de Arrhenius e sugeriram a seguinte expressão para a idade equivalente (Carino e Lew, 2001):

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \Delta t \quad (2)$$

A função FHP, designação devida aos investigadores que a desenvolveram, embora seja de maior complexidade, é a que melhor representa o real efeito da temperatura na velocidade das reações de hidratação do cimento. No entanto, quando se utiliza a função de maturidade FHP, é recomendável que se determine previamente o valor da energia aparente de ativação para o betão em questão, de modo a obter-se uma boa precisão nas estimativas de resistência. A energia de ativação (E_a) pode ser obtida experimentalmente a partir do procedimento ASTM C 1074 (Barbosa *et al.*, 2005).

2.2 Terminologias do método da maturidade

O presente subcapítulo apresenta as definições dos termos utilizados no método da maturidade:

Fator Temperatura – Tempo - representa a maturidade do betão obtida em função da temperatura e da idade real.

Temperatura de referência (*datum temperature*) - depende do tipo de cimento e do uso ou não de adjuvantes. O valor sugerido na norma ASTM 1074 é de 0 °C para temperaturas de cura da amostra no intervalo entre os 0 °C e os 40 °C.

Idade Equivalente - é o intervalo de tempo de cura que uma amostra, a uma dada temperatura, necessita para atingir uma maturidade igual à que seria obtida num tempo de cura com uma temperatura diferente da temperatura específica.

Energia Aparente de Ativação - conceito introduzido por Arrhenius em equações que traduzem reações químicas entre moléculas. Para que ocorra uma reação química, é necessário que exista uma quantidade mínima de energia cinética, de forma a permitir que os reagentes se transformem em produtos.

2.3 Vantagens e Desvantagens da aplicação do método da maturidade

O conceito do método maturidade pode ser usado para quantificar o desenvolvimento da resistência de uma determinada mistura de betão. Mesmo para as idades iniciais, horas após a sua aplicação, em que o betão esteja exposto a temperaturas baixas ou altas a sua resistência pode ser estimada com precisão. Quando as temperaturas de cura estão baixas, o tempo para atingir a maturidade designada será maior do que nos casos onde as curas estão a uma temperatura superior (Verbeck e Helmuth, 1968, citado por Carino *et al.*, 2001).

Por estas razões, é bastante vantajosa a aplicação do método, ou seja, é possível antecipar a descofragem ou iniciar atividades críticas com segurança, diminuindo o tempo de execução em função da resistência atingida, acelerando o processo construtivo, poupando tempo e dinheiro. O método da maturidade é facilmente aplicável *in situ*, em situações de pré-fabricação, e na maioria dos laboratórios de materiais de construção, apresentando uma redução da quantidade e dos custos dos ensaios à rotura de provetes de betão.

As limitações do método estão relacionadas com o impacto que a temperatura nas idades iniciais tem na resistência a longo prazo. Carino (1991) concluiu o estudo de McIntosh (1956), referindo que não se tem em conta a qualidade da cura nas funções de maturidade com base no produto do tempo e de uma temperatura acima da temperatura de referência, ou seja, o método não pode explicar a maturidade em condições de cura a elevadas temperaturas, que resulta numa redução da resistência esperada.

As curvas resistência-maturidade devem ser desenvolvidas para cada mistura específica. Segundo a norma ASTM C 1074 (2004), a precisão da curva depende de parâmetros como a quantidade de água para a hidratação do cimento, o volume de vazios no betão, da energia de ativação e da temperatura específica. Se a mistura for alterada, deve ser desenvolvida uma nova curva resistência-maturidade.

2.4 Norma ASTM C-1074

2.4.1 Introdução

A ASTM criou em 1987 uma norma para a aplicação do método da maturidade na determinação da resistência do betão *in situ* (ASTM C 1074). Segundo esta, para aplicar o método da maturidade é necessário realizar as seguintes etapas:

- Determinação do fator maturidade-resistência de acordo com o tipo de mistura que se pretende utilizar *in situ*;
- Monitorização da evolução da temperatura do betão desde que é betonado até à idade em que se pretende efetuar os últimos testes de resistência;
- O registo de temperaturas no *datalogger* é utilizado para calcular o índice de maturidade do betão utilizado *in situ*;
- Com base no índice de maturidade e na relação maturidade-resistência, é possível estimar a resistência do betão *in situ*.

Um esquema da aplicação do método da maturidade é mostrado na Figura 2.2.

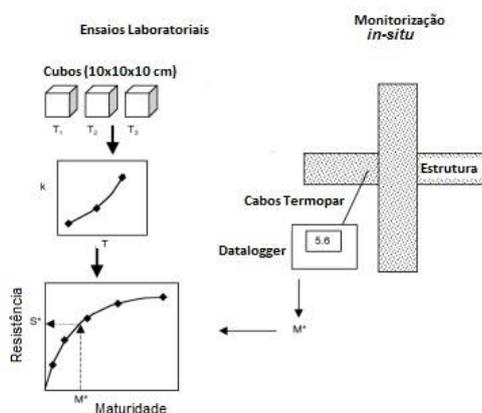


Figura 2.2 - Esquema de aplicação do método de maturidade (Carino e Lew, 2001; adaptado)

2.4.2 Determinação da relação maturidade – resistência

Descreve-se de seguida o procedimento laboratorial para a determinação da relação maturidade-resistência pela norma:

- Preparar pelo menos 15 provetes com proporções e constituintes semelhantes às do betão do qual se pretende estudar a resistência.
- Devem inserir-se cabos termopares no interior, no mínimo em dois provetes. Os cabos termopares devem ser imediatamente ligados ao *datalogger*.
- Os provetes devem ser colocados em reservatórios de água ou câmaras climatizadas, com temperatura e humidade programáveis.
- Ensaiar 2 provetes à compressão nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias. Se o valor variar mais de 10% entre ambos, deve-se ensaiar um terceiro cubo e calcular a média das resistências.
- No uso do *datalogger* para registo das temperaturas, deve determinar-se o índice de maturidade para todas as idades de ensaios.
- Traçar a linha da média das resistências à compressão em função do índice de maturidade. Determinar a curva resistência-maturidade usada para determinar a resistência da mistura para curas sobre outras condições.
- Quando especificado, é possível calcular a resistência à flexão em função do índice de maturidade. Preparam-se 15 provetes barra de betão (com as dimensões 15x5x5 cm), colocando cabos termopares em 2 desses provetes ligados ao *datalogger*, para registo das temperaturas. Serão ensaiados 2 provetes barra nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias.

2.4.3 Determinação da *datum temperature* e da energia aparente de ativação

A temperatura de referência ou *datum temperature* (T_0) depende de diversos parâmetros, como a composição da mistura, a classe do cimento, a existência ou não de adjuvantes e também a sua percentagem na dosagem utilizada.

Os testes necessários para determinar experimentalmente a temperatura de referência e a energia de ativação podem ser realizados utilizando amostras de argamassa e os resultados são aplicáveis para o betão. É necessário estabelecer uma relação entre a resistência à compressão em função da idade para os provetes de argamassa curados a três temperaturas diferentes. A temperatura máxima e mínima a que o betão *in situ* estará exposto indica os valores para duas das condições de cura. A terceira condição de cura será a uma temperatura intermédia entre estes dois valores. A argamassa deverá ter a mesma relação de agregados-cimento, a mesma relação água-cimento e a mesma percentagem de adjuvantes que o betão em estudo.

O procedimento experimental da norma ASTM C 1074 segue as seguintes etapas:

- Preparação de 18 moldes de argamassa com 50 mm para cada temperatura. Após adquirirem resistência suficiente, os moldes com argamassa são mergulhados num reservatório com água à temperatura prevista para a cura.
- Para cada temperatura são ensaiados 3 provetes de argamassa, com uma idade aproximadamente do dobro da idade a que decorrem os ensaios dos provetes de betão.
- A razão resistência/idade dos ensaios às 3 temperaturas será analisada para determinar a relação do parâmetro k pelo ganho de resistência.
- Inserir num gráfico o eixo y como o inverso da resistência e o eixo x como o inverso da idade de cura. Para cada temperatura de cura, inserir os valores inversos dos ensaios à compressão ao longo do eixo y , e o inverso de cada idade de cura do eixo x como se observa na Figura 2.3 a). Determinar a interceção com o eixo y da linha de tendência dos pontos do gráfico para cada conjunto de temperatura. O inverso do valor da interseção, pelos valores médios de rotura para cada idade, gera o parâmetro A . Criar um gráfico com o parâmetro A no eixo dos y em função da idade no eixo x , tirando a linha de tendência para cada conjunto de temperaturas, como demonstrado na Figura 2.3 b). O parâmetro k determina-se pela interseção das linhas de tendência com o eixo y .

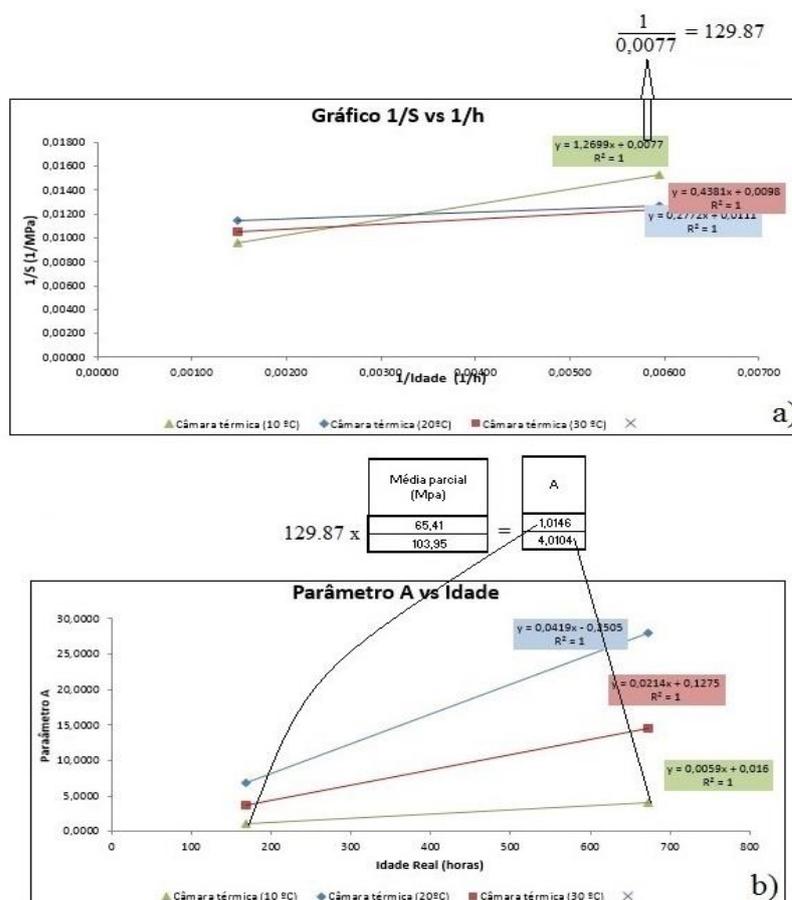


Figura 2.3 - a) Gráfico do inverso da resistência mecânica pelo inverso da idade; b) Gráfico do parâmetro A pela idade de cura

- Inserindo num gráfico os valores do parâmetro k no eixo y, em função da temperatura de cura no eixo x, cada valor do parâmetro k irá corresponder a uma temperatura, gerando a linha de tendência dos pontos do gráfico. O valor da interseção da linha de tendência com o eixo da temperatura dá a *datum temperature*.
- Para determinar a energia de ativação é preciso calcular os logaritmos neperianos dos parâmetros k e a temperatura absoluta da água de cura em graus Kelvin. De seguida apresentam-se os valores num gráfico com os logaritmos no eixo y e a temperatura no eixo x. Gerando a linha de tendência dos pontos do gráfico, o valor negativo da inclinação da linha será o parâmetro Q, que dividido pela constante dos gases perfeitos, ($R=8.314 \times 10^3 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$), dá o valor para a energia de Ativação em kJ/mole

2.4.4 Determinação da resistência *in situ* do betão

O processo para o cálculo da resistência *in situ* está completamente descrito na norma ASTM C 1074:

- Assim que se coloca a mistura nos moldes, inserir os cabos termopares no betão fresco. Em provetes colocar no centro, em elementos de estruturas colocar em seções críticas, ou que estejam sujeitas a condições de exposição especiais ou solicitadas em termos de esforços.
- Ligar os cabos termopares ao *datalogger* ou aparelho de cálculo de maturidade, iniciando o registo de dados o mais brevemente possível. Deve utilizar-se o mesmo valor da temperatura de referência ou de energia de ativação que é utilizado no cálculo do índice de maturidade.
- Para estimar o valor da resistência numa dada zona, é necessário calcular o índice de maturidade com base nas leituras do *datalogger*, ou no caso de uso de aparelho de maturidade apenas ler o valor.
- Com recurso à relação maturidade-resistência, calcular a resistência à compressão do betão para cada idade de cura.
- Antes de realizar tarefas críticas, como remoção de cofragem ou aplicação de pré-esforço, deve-se comparar a resistência do betão com recurso a outros testes de modo a confirmar que os valores da resistência obtidos pelo método da maturidade são coerentes com a resistência real do betão.

3. BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL

3.1 Introdução

Na década de 1980, no Japão, surgiu a preocupação de manter a qualidade e durabilidade das estruturas de betão, após uma súbita redução de trabalhadores qualificados nas décadas anteriores (Okamura e Ouchi, 2003).

Em 1986, o professor Hajime Okamura propôs um novo tipo de betão, o betão auto-compactável (Ouchi, 1999). O betão auto-compactável tem a capacidade de escoar e preencher todos os cantos de uma cofragem por meio do seu próprio peso, sem a necessidade de compactação. O desenvolvimento do betão auto-compactável de elevado desempenho está relacionado com a evolução de superplastificantes químicos que possibilitam elevada fluidez e reduzidas relações w/c .

3.2 Aplicação de BAC

Existem benefícios significativos da aplicação de BAC. Após o seu desenvolvimento na Universidade de Tokyo, a primeira construção em betão auto-compactável foi num edifício residencial em junho de 1990. Sempre em pequena escala, foi então utilizado nas torres de uma ponte de betão pré-esforçada atirantada, em 1991 (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Ponte Shin-Kiba Ohashi (Okamura et al., 2003)

Como primeira utilização em construções de grandes dimensões está a betonagem das ancoragens da Ponte de Akashi-Kaikyo (Figura 3.2). Esta abriu em abril de 1998, na altura a ponte com o vão mais longo do mundo (1991 metros). Foi então introduzido um novo sistema de construção, que faz pleno uso da fluidez do BAC. Este era misturado na central de produção adjacente ao estaleiro da obra, e era bombeado 200 metros através de tubos diretamente para as cofragens, onde era lançado de uma altura de 3 metros sem ocorrer segregação, a partir de válvulas de gaveta localizados em intervalos de 5 metros. O caudal de betão descarregado pelas válvulas era controlado de modo a que o nível de superfície do betão fosse mantido constante. O tamanho máximo do agregado foi de 40 mm. O uso de BAC na construção das ancoragens encurtou o seu prazo de construção em 20% (Ouchi, 2001).



Figura 3.2 - Ancoragem da Ponte Akashi-Kaikyo (Okamura et al, 2003)

Na década de 1990 o BAC foi introduzido na Europa, tendo sido a Holanda e Suécia os pioneiros no emprego de BAC (Bennenk, 2005 e Billberg e Osterberg, 2002 citado por Thrane, 2007).

Segundo a European Ready Mixed Concrete Organization, o uso de BAC em 2012 na Europa representa apenas 2%, comparativamente ao BC (ermco.eu, 2012), como sugere a Figura 3.3. Esta estimativa pode ser influenciada por uma falta de conformidade com a definição do BAC (Ouchi 1999).

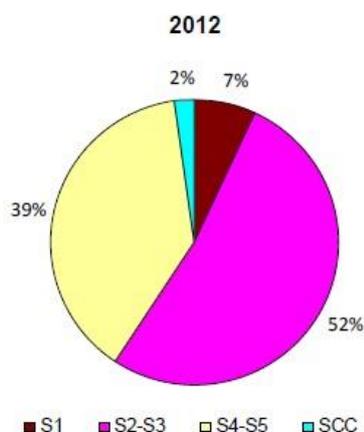


Figura 3.3 – Produção na Europa no ano 2012, por classe (ERMCO.eu , 2014)

A indústria da pré-fabricação tem como fundamentos a necessidade de implementar iniciativas que conduzam à melhoria da produtividade, estando dependente da evolução das tecnologias construtivas para níveis de industrialização cada vez maiores e do desenvolvimento de processos de produção organizados, tudo isto com o intuito de reforçar os níveis de competitividade do setor (Couto, 2008). O BAC foi bem recebido nesta indústria, tendo os produtores de pré-fabricados passado a usá-lo para uma parte considerável da sua produção (Thrane, 2007).

O BAC atualmente é utilizado em todo o tipo de construções (Okamura *et al.*, 2000):

- Pontes (ancoragens, arcos, vigas, torres, juntas...);
- “*Box culvert*”;
- Edifícios;
- Pilares de aço preenchidos com betão;
- Túneis;
- Barragens;
- Pré-fabricação de betão (blocos, paredes, tanques de água, lajes).

3.3 Propriedades do BAC

3.3.1 Propriedades do BAC no estado fresco

Segundo Ouchi (2001) o método para alcançar a auto-compactabilidade envolve não só a elevada deformabilidade da pasta ou argamassa, mas também a resistência à segregação entre agregado grosso e a argamassa quando o betão flui através das zonas confinadas com as armaduras. A frequência de colisão e contato entre partículas do agregado pode aumentar à medida que a distância relativa entre as partículas diminui. Por sua vez, o esforço interno pode aumentar quando o fluxo de betão alcança uma irregularidade, particularmente perto de obstáculos ou uma alteração de direção. A energia necessária para ocorrer o fluxo é consumida pelo aumento da pressão interna, resultando no bloqueio das partículas de agregado. Limitar a dimensão máxima do agregado grosso, cujo consumo de energia é particularmente intenso, para um nível inferior é eficaz para evitar esse tipo de bloqueio. Outro fator fulcral é uma argamassa altamente fluida. A alta deformabilidade só consegue ser alcançada pelo emprego de um superplastificante, mantendo a proporção w/c com um valor baixo.

3.3.2 Vantagens, desvantagens e aplicações do BAC

Segundo Thrane (2007) as principais vantagens para a aplicação do BAC são:

- Redução do risco de existência de chochos (zonas não preenchidas), de má compactação e de matriz heterogénea.
- É possível acelerar a descofragem, reduzir a mão de obra e dispensa o processo de acabamento final com recurso a lixadoras em soluções de betão à vista. Deve ter em conta a possibilidade de custos adicionais, ao reforçar e projetar a cofragem para pressões hidrostáticas mais elevadas.
- As condições de trabalho são significativamente melhoradas ao evitar a vibração. Um dos danos mais nocivo à saúde dos operários deve-se ao manuseamento das ferramentas de vibração originando uma patologia de

circulação sanguínea nas mãos conhecida como “dedos brancos”, assim como poupando-os ao intenso ruído (Skarendahl, 2000).

- O BAC permite novas possibilidades em arquitetura de estruturas de betão, permitindo a betonagem de elementos de geometria complexa.

Em termos económicos, Walraven (2003) enunciou que o BAC, devido à utilização de superplastificantes e maior dosagem de ligantes, é mais caro cerca de 5€/m³, comparativamente ao BC utilizado na indústria do betão pronto e pré-fabricação. Por outro lado, o seu uso gera poupança nos seguintes fatores:

- O consumo de energia elétrica é reduzido, dado que a vibração é dispensada (estimativa de poupança de 10%);
- As cofragens podem tornar-se mais aligeiradas e simplificadas, uma vez que a única força aplicada é a pressão hidrostática. Dispensa o uso de isolantes de vibrações entre cofragens, que podem ser ligadas usando conectores magnéticos, reduzindo o tempo para montar e desmontar cofragens em 50%. O tempo de vida útil das cofragens é prolongado, estimando-se uma poupança de 20%;
- Custos de manutenção reduzem-se em 10%;
- Melhoria das condições de trabalho, resultando numa melhoria na saúde dos operários, revela uma poupança estimada de 10%.

3.4 Constituintes do BAC

Os ligantes utilizados no fabrico de BAC incluem, além do cimento selecionado, várias adições, desde cinzas volantes, sílica de fumo, sílica ativa, escória moída de alto forno, cal hidráulica, fíler calcário, entre outros. Neste estudo foram utilizados cimentos CEM I 52,5R e CEM II-A/L 42,5R (da Secil) e adições de fíler calcário (Omya Comital) e de sílica de fumo (Sika).

O tamanho máximo do agregado geralmente deve ser limitado a 12-20 mm (Self-Compacting Concrete European Project Group, 2005).

Uma vez que, no fabrico de betões auto-compactáveis, são aplicadas razões w/c mais reduzidas, é importante manter a fluidez da matriz. Para tal são utilizados superplastificantes (SP) de segunda ou terceira geração. Estes aumentam a fluidez do betão, mantendo esse estado durante o tempo necessário à sua aplicação.

No presente trabalho foi utilizado o superplastificante Glenium Sky 625 da BASF, à base de polímeros éter-carboxílicos, com função de acelerador de endurecimento. Trata-se de um adjuvante de alto desempenho, que se destaca pela excecional redução de água mesmo em baixas dosagens, permitindo elevados abaixamentos no ensaio de consistência.

A mistura do cimento com água inicia a reação de hidratação, onde as moléculas de água são absorvidas pelas partículas de cimento, originando o gel de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), o qual solidifica com a presa e forma a pasta de ligante endurecida.

Devido à presença das moléculas do SP dá-se o efeito de dispersão, onde os grânulos de cimento amolecido atraem as moléculas de SP após a amassadura. Isto aumenta as cargas negativas das partículas de cimento, gerando a repulsa electrostática, o que leva à dispersão dos grânulos. Apesar das pequenas quantidades de água empregues, este efeito leva a uma excelente trabalhabilidade do betão (Pereira *et al.*, 1999). Walraven (2003) afirma que a aplicação de fibras no BAC poderá mesmo vir a substituir o betão armado comum.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito todo o programa experimental para a determinação dos parâmetros para o cálculo do método da maturidade nos betões auto-compactáveis em estudo. São descritos os procedimentos e métodos laboratoriais, assim como o equipamento e material utilizado. É ainda estabelecida a relação ente a resistência à compressão dos provetes de betão e a sua maturidade. Todo o trabalho laboratorial foi desenvolvido no laboratório de Materiais de Construções do DEC-ISEC.

4.1 Estudo e caracterização das misturas

Foram estudados e produzidos quatro betões auto-compactáveis de elevado desempenho, variando o nível de resistência à compressão, com valores alvo de 60 MPa (B_60) e de 100 MPa (B_100), e duas situações nas adições ao cimento, uma com fíler calcário (FC) e outra com fíler calcário e sílica de fumo (SF). Estas variações na seleção e dosagem dos ligantes, quer para a resistência final da mistura, quer nas adições, foram utilizadas de modo a salientar as suas características e parâmetros em estudo.

Para o estudo de composição dos betões, utilizaram-se os parâmetros da matriz ligante e os de ajuste granulométrico propostos por Costa *et al.* (2010), onde a previsão de resistência se baseia na expressão de Feret e o ajuste granulométrico é efetuado pela aproximação à curva de referência de Faury. Definiu-se a compacidade com o valor constante de 0,83, o teor de ar de 1% e aproximou-se a dosagem volumétrica do ligante a 200 litros/m³. Nas misturas com adição de sílica, a respetiva dosagem adotada foi de 8% da massa de cimento. Na mistura B_60_FC utilizou-se o cimento CEM II/A-L 42.5R e nas misturas B_60_SF e B_100 o cimento CEM I 52.5R, tendo as dosagens sido definidas de modo a aproximar a resistência alvo da pasta. A dosagem de fíler em cada mistura resultou na dosagem complementar para a dosagem total de ligante definida. Os agregados selecionados foram duas areias siliciosas, uma fina 0/1mm e outra média 0/4mm, areão 4/8mm e brita calcária 8/14mm. Todos os constituintes sólidos foram caracterizados em relação à sua massa volúmica e caracterizou-se a granulometria dos agregados (Figura 4.1).

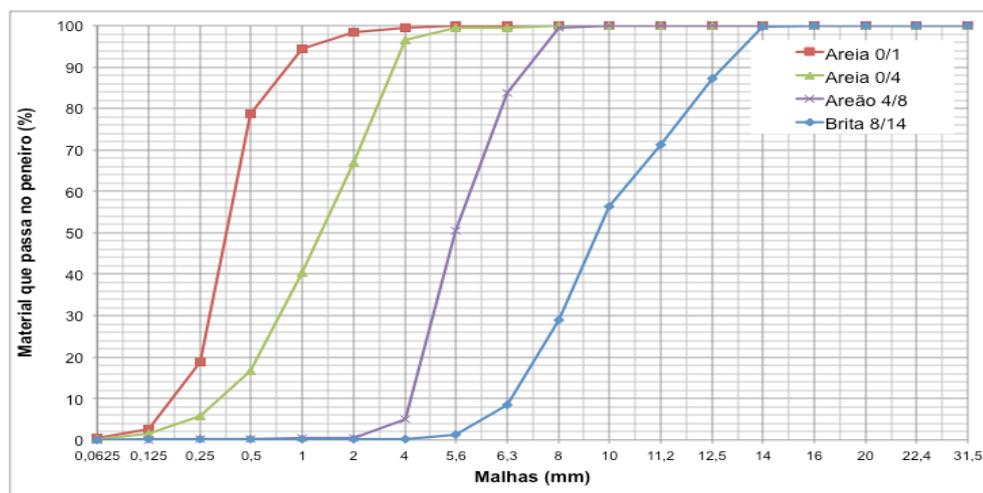


Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos agregados

Produziram-se provetes cúbicos de 10 cm, utilizando moldes duplos (Figura 4.2), os quais foram curados, após desmoldagem, por imersão em tanque de cura. Realizaram-se ensaios de compressão às 24 horas e aos 3, 7, 14, 28 e 56 dias de idade do betão para a determinação da resistência à compressão. Estes dados foram utilizados para aferir a curva maturidade-resistência determinada pelo método da maturidade à resistência real dos provetes. Segundo a norma ASTM C 1074 para a produção das misturas das argamassas utilizam-se as proporções dos respectivos constituintes de cada betão cuja resistência se pretende estimar. Nas argamassas, foram utilizados moldes cúbicos de 10 cm de aresta, para a leitura das temperaturas, e moldes triplos de forma paralelepípedica de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ (Figura 4.2). Os ensaios de resistência à flexão e à compressão decorreram aos 7 e 28 dias.



Figura 4.2 - Moldes utilizados: a) Forma Cúbica b) Forma paralelepípedica c) Provetes de argamassa em cura na câmara térmica

A mistura de betão com uma resistência estimada aos 28 dias de 60 MPa, cimento CEM II/A-L 42.5R e adição de fíler calcário designou-se B_60_FC, sendo a respetiva mistura da matriz de argamassa designada A_60_FC. O betão com parâmetros semelhantes e adições de sílica de fumo e fíler calcário designou-se B_60_SF, sendo a respetiva mistura da matriz de argamassa designada A_60_SF. A mistura de betão com uma resistência estimada aos 28 dias de 100 MPa, cimento CEM I 52.5R e adição de fíler calcário designou-se B_100_FC, sendo a respetiva mistura da matriz de argamassa designada A_100_FC. O betão com parâmetros semelhantes aos do anterior e adições de sílica de fumo e fíler calcário designou-se B_100_SF, sendo a respetiva mistura da matriz de argamassa designada A_100_SF. No Quadro 4.1 são resumidas as proporções das misturas de betão para 1 m³. No Quadro 4.2 são apresentadas as misturas para as correspondentes argamassas.

Quadro 4.1 – Composição dos betões em estudo

	B_60_FC	B_60_SF	B_100_FC	B_100_SF
Cem I 52.5 R (kg/m ³)	-	320,0	500,0	450,0
Cem II/A-L 42.5 R (kg/m ³)	350,0	-	-	-
Fíler (kg/m ³)	245,0	230,4	100,0	108,0
Sílica de Fumo (kg/m ³)	-	25,6	-	36,0
Adjuvante (kg/m ³)	3,5	3,2	5,5	5,4
Água (kg/m ³)	156,7	157,0	154,8	154,9
Areia Fina 0/1 (kg/m ³)	98,4	99,6	100,3	99,5
Areia Média 0/4 (kg/m ³)	885,8	896,6	902,7	895,3
Areão (kg/m ³)	132,7	132,4	132,2	132,4
Brita Calc.8/14 (kg/m ³)	535,0	533,5	532,6	533,7

Quadro 4.2 - Composição das argamassas em estudo

	A_60_FC	A_60_SF	A_100_FC	A_100_SF
Cem I 52.5 R (kg/m ³)	-	-	666,68	600,79
Cem II/A-L 42.5 R (kg/m ³)	467,32	427,21	-	-
Fíler (kg/m ³)	327,11	307,63	133,32	144,21
Sílica de Fumo (kg/m ³)	0,00	34,16	0,00	48,05
Adjuvante (kg/m ³)	4,68	4,21	7,32	7,21
Água (kg/m ³)	209,21	208,79	207,05	206,26
Areia Fina 0/1 (kg/m ³)	131,42	133,00	133,74	132,79
Areia Média 0/4 (kg/m ³)	1182,63	1196,84	1203,63	1195,32

4.2 Condições de cura

O betão fabricado em laboratório foi colocado em moldes cúbicos de 10 cm de aresta, ficando em presa e endurecimento, nas condições do laboratório durante 24 horas, até adquirir resistência suficiente para ser descofrado. Após este passo os provetes foram inseridos em tanque de água (Figura 4.3) com a temperatura controlada a 20°C. Cerca de 24 horas antes de cada ensaio de resistência à compressão era retirado o número necessário de provetes para o ensaio, ficando a secar à atmosfera do laboratório.

Em relação às argamassas, e seguindo o procedimento da norma ASTM C 1074, a aplicação do método da maturidade implica a simulação de 3 ambientes de cura para determinar os seus efeitos no ganho de resistência. Após o seu fabrico, as argamassas eram colocadas num molde cúbico e em moldes paralelepípedos sendo inseridas na câmara térmica (Figura 4.3). A câmara térmica esteve sujeita a temperaturas diferentes, 10°C, 20°C e 30°C mantendo em todas as condições de cura a humidade relativa dentro da câmara a 95%.



Figura 4.3 - Condições de Cura: a) Interior da câmara térmica; b) Câmara térmica ; c) Cura em recipiente com água

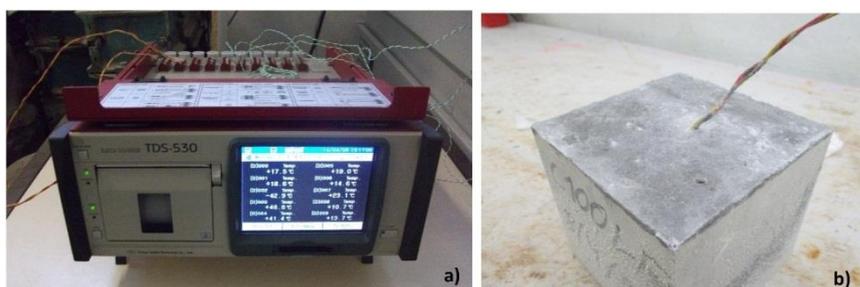
4.3 Monitorização e ensaio dos provetes

4.3.1 Provetes de Betão

Como enuncia a norma ASTM C 1074, as temperaturas a que o betão e argamassas estão sujeitos devem ser completamente registados durante a cura, para que seja possível calcular o índice de maturidade ou como alternativa pode ser utilizado um aparelho que calcule automaticamente o índice de maturidade.

No presente trabalho foi utilizado um *datalogger* TDS 530 (Figura 4.4 a)) que registou as temperaturas do betão, argamassa e dos meios em que se deu a cura. Tendo sido programado com uma frequência de registos a cada 2 minutos e com 10 canais disponíveis, visível em ecrã táctil e armazenamento automático em cartão de memória das temperaturas. A cada canal esteve ligado um terminal de cabo termopar, o outro terminal foi inserido nas misturas ainda frescas, no cubo (Figura 4.4 b)).

Os dados do *datalogger* ficaram registados em cartão de memória que possibilitou a exportação para computador, o ficheiro criado com os dados é executável como Folha de Cálculo no programa Microsoft Excel, facilitando todo o processo de tratamento de dados.



**Figura 4.4 - Instalação Laboratorial: a) Datalogger a registar temperaturas de cura;
b) Provede de betão com termopar**

Simultaneamente com a determinação do índice de maturidade foram realizados ensaios de resistência à compressão para comparar a resistência calculada com base no método da

maturidade com a resistência real do betão, para tal foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de 3000kN (Figura 4.5 a)).

Conforme referido, os ensaios de resistência à compressão para comparação dos valores com o método da maturidade foram realizados ao dia 1, 3, 7, 14, 28 e 56 de idade de cada tipo de betão, sendo ensaiados 3 provetes em cada idade, exceto aos 14 e 56 dias em que se ensaiaram 2 provetes.

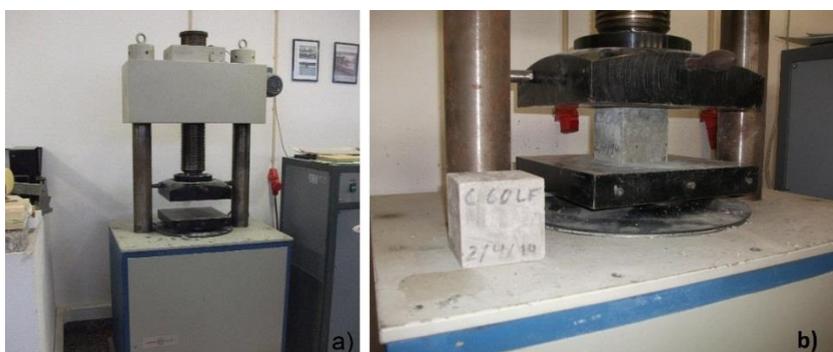


Figura 4.5 - Ensaios de resistência à compressão: a) Prensa Microtest; b) Ensaio.

4.3.2 Provetes de Argamassa

À semelhança da monitorização realizada para os provetes de betão foi utilizado o *datalogger* TDS 530 para o registo das temperaturas experimentadas pelas argamassas durante a cura na câmara térmica. Este instrumento não é de fundamental utilização nas argamassas já que os parâmetros necessários para o método da maturidade são obtidos com recurso a ensaios de resistência à compressão, o seu uso permitiu verificar que a câmara térmica manteve as temperaturas para qual estava programada durante toda a idade de cura. A resistência à compressão deste tipo de provetes foi ensaiado na prensa universal de tração/compressão com capacidade de 200kN (Figura 4.6).



Figura 4.6 – a) Prensa universal e ensaio de resistência à compressão; b) Ensaio de resistência à compressão de provetes de argamassa

4.4 Produção do betão

Os quatro betões foram fabricados com o mesmo método e equipamento de modo a replicar as condições de ensaio. Para a produção do betão iniciou-se uma rigorosa pesagem de todos os constituintes, com recurso a um recipiente por constituinte e uma balança digital com precisão de um grama (Figura 4.7 a)). De seguida os constituintes foram introduzidos na misturadora de eixo vertical (Figura 4.7 b)) com capacidade de 20 litros de volume, dando início à mistura de todos os constituintes obtendo-se betão fluido e homogéneo, o qual foi colocado em moldes sem compactação e com ausência de sinais de segregação.

Fabricaram-se para cada tipo de betão 18 litros de mistura, de modo a garantir que existia um excedente ao preencher os moldes e que o betão despejado nos 16 moldes era homogéneo e com características semelhantes. Após a betonagem os provetes foram deixados a endurecer 24 horas, à temperatura ambiente no laboratório (Figura 4.7 c)).



Figura 4.7 - a) balança ; b) misturadora ; c) moldes e provetes de betão

5. RESULTADOS

No presente capítulo são descritos todos os valores obtidos dos ensaios laboratoriais, utilizados para a aplicação e comparação com o método da maturidade, aos vários tipos de betão auto-compactável em estudo.

5.1 Ensaios com Argamassa

O Quadro 5.1 apresenta os resultados dos ensaios realizados nos provetes de argamassa, os valores mostram-se coerentes entre si e com baixas variações conforme se verifica pelo desvio padrão e pelo coeficiente de variação.

Quadro 5.1 - Resultados dos ensaios realizados nos provetes de argamassa.

		A_60_FC			A_60_SF			A_100_FC			A_100_SF		
		f_{cm} (MPa)	Δf_{cm} (MPa)	s (MPa)									
7 dias	10° C	65,41	0,32	0,005	60,65	1,79	0,03	88,07	6,39	0,073	87,55	0,48	0,005
	20° C	78,52	1,57	0,020	85,17	1,89	0,022	116,79	6,00	0,051	114,69	4,56	0,04
	30° C	80,45	2,20	0,027	82,06	0,73	0,009	117,72	0,99	0,008	117,26	1,81	0,015
28 dias	10° C	104,81	3,45	0,033	104,88	4,21	0,040	117,17	4,46	0,038	117,67	5,79	0,049
	20° C	86,70	2,03	0,024	92,54	1,09	0,012	118,47	4,61	0,039	117,16	0,35	0,003
	30° C	95,73	5,93	0,062	98,13	4,12	0,042	134,94	3,72	0,027	136,09	5,48	0,040

Apenas para uma mistura se atestaram valores muito elevados no 1º ensaio à compressão, o que resultou em valores elevados para a *datum temperature*. Foi repetida a produção da mistura e os respetivos ensaios para substituir valores. Podemos agora concluir que este facto se deveu ao primeiro ensaio à compressão ser aos 7 dias, ensaio que deveria ter sido antecipado para idades mais jovens de cura, 24 horas ou 3 dias, dado tratar-se de uma mistura com superplastificante acelerador de endurecimento e cimento tipo CEM I as principais reações de

hidratação do cimento acontecem logo aos primeiros dias de cura, obtendo rapidamente valores elevados de capacidade de resistência à compressão.

Demonstra-se graficamente (Figura 5.1; Figura 5.2; Figura 5.3; Figura 5.4) os valores dos ensaios à compressão obtidos das argamassas, de acordo com o tipo e temperatura de cura a que foram expostas.

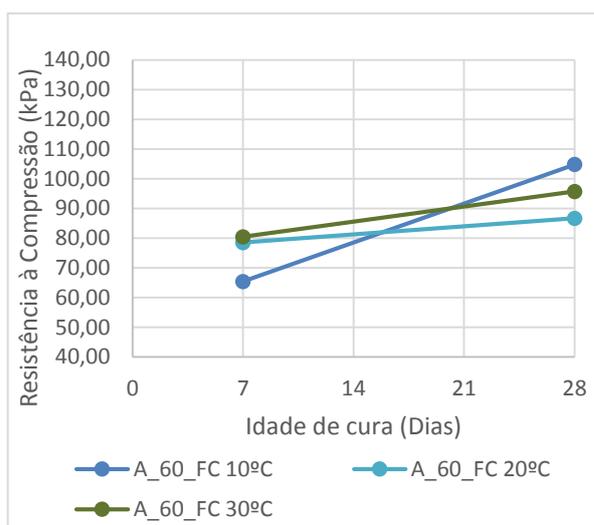


Figura 5.1 - A_60_FC

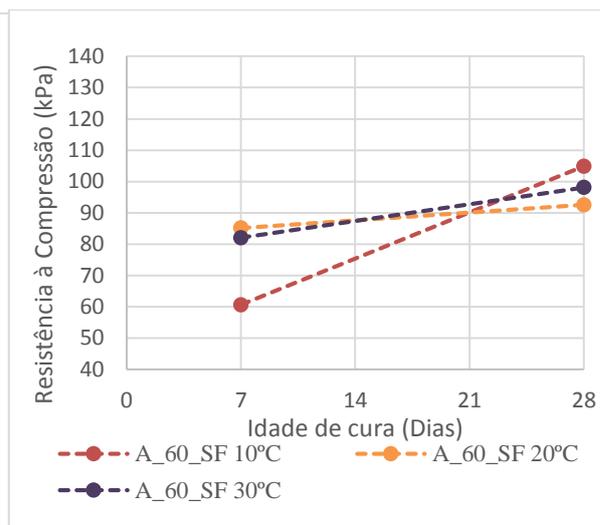


Figura 5.2 - A_60_SF

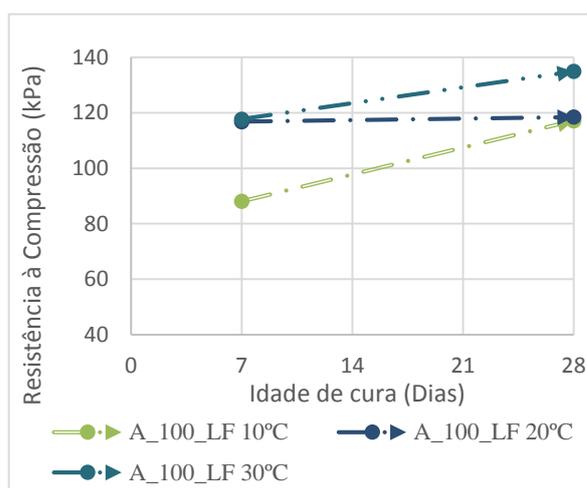


Figura 5.3 - A_100_FC

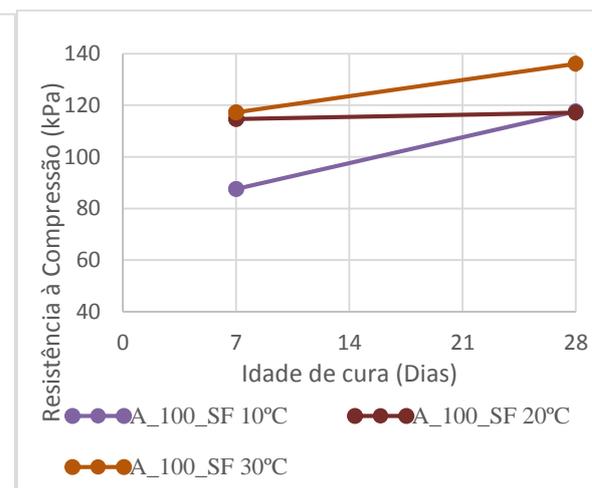


Figura 5.4 - A_100_SF

Em todas as misturas se verifica um padrão semelhante de evolução da resistência à compressão. Em particular, a resistência das argamassas curadas a 10°C tem os valores mais baixos aos 7 dias, enquanto aos 28 dias nas argamassas de 60 MPa tem os valores mais elevados e nas argamassas de 100 MPa atinge os valores da cura a 20°C. Esta evolução vem do facto das temperaturas de cura mais baixas, provocarem uma redução da velocidade de reação de hidratação na matriz cimentícia (Kosmatka *et al.*, (2003)), prolongando-se a reação ao longo do tempo de cura e evoluindo os valores da resistência à compressão. A cura a 30°C originou valores superiores nas idades iniciais, evoluindo mais lentamente até aos 28 dias.

5.1.1 Cálculo da *Datum Temperature* e da energia de ativação

Com base na norma ASTM C 1074 foram determinados os parâmetros da T_0 (temperatura de referência) e da E_a (energia de ativação).

Os quadros 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 demonstram os valores utilizados de acordo com a matriz de argamassa.

Apresentam-se de seguida os gráficos (Figura 5.5 até Figura 5.8) que permitiram o cálculo da T_0 (temperatura de referência) e da E_a (energia de ativação).

Quadro 5.2- Determinação da T_0 e da E_a para a A_60_FC

Temperatura de Cura	A_60_FC							
	Média Total por ambiente (MPa)	S_u	K	$\ln(k)$	Temperatura em Kelvin	1/Temperatura (1/k)	T_0 (°C)	E_a (kJ/mol)
Câmara térm. (10 °C)	84,68	129,87	0,0059	-5,13	283,44	0,0035	9,50	47,22
Câmara térm. (20 °C)	82,75	90,09	0,0419	-3,17	293,11	0,0034		
Câmara térm. (30 °C)	87,96	102,04	0,0214	-3,84	303,14	0,0033		

Quadro 5.3- Determinação da T_0 e da E_a para a A_60_SF

Temperatura de Cura	A_60_SF							T_0 (°C)	E_a (kJ/mol)
	Média Total por ambiente (MPa)	S_u	K	ln(k)	Temperatura em Kelvin	1/Temperatura (1/k)			
Câmara térm. (10 °C)	82,25	136,99	0,0046	-5,38	283,51	0,0035	8,11	59,26	
Câmara térm. (20 °C)	88,81	95,24	0,0493	-3,01	293,06	0,0034			
Câmara térm. (30 °C)	89,92	104,17	0,0230	-3,77	303,05	0,0033			

Quadro 5.4 - Determinação da T_0 e da E_a para a A_100_FC

Temperatura de Cura	A_100_FC							T_0 (°C)	E_a (kJ/mol)
	Média Total por ambiente (MPa)	S_u	K	ln(k)	Temperatura em Kelvin	1/Temperatura (1/k)			
Câmara térm. (10 °C)	103,06	133,33	0,0115	-4,47	283,36	0,0035	4,10	36,11	
Câmara térm. (20 °C)	118,43	129,87	0,0066	-5,02	293,15	0,0034			
Câmara térm. (30 °C)	126,10	140,85	0,0318	-3,45	303,14	0,0033			

Quadro 5.5 - Determinação da T_0 e da E_a para a A_100_SF

Temperatura de Cura	A_100_SF							T_0 (°C)	E_a (kJ/mol)
	Média Total por ambiente (MPa)	S_u	K	ln(k)	Temperatura em Kelvin	1/Temperatura (1/k)			
Câmara térm. (10 °C)	102,84	133,33	0,0116	-4,46	283,70	0,0035	12,78	34,05	
Câmara térm. (20 °C)	115,92	117,65	0,0467	-3,06	293,05	0,0034			
Câmara térm. (30 °C)	125,66	140,85	0,0293	-3,53	303,11	0,0033			

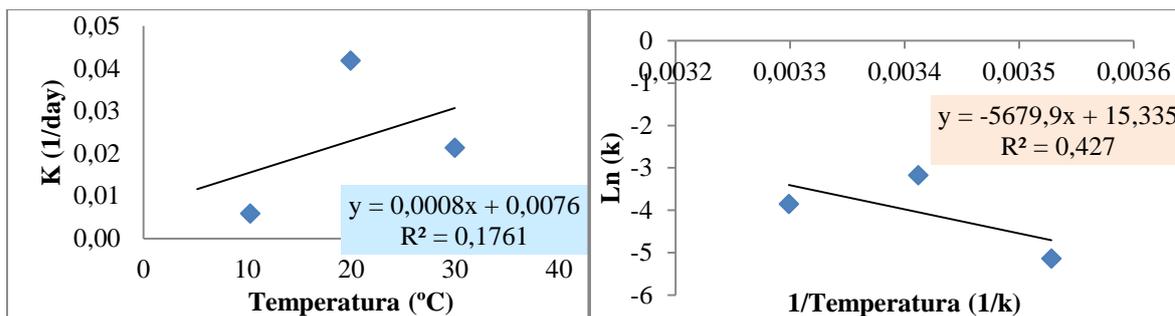


Figura 5.5 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A₆₀_FC

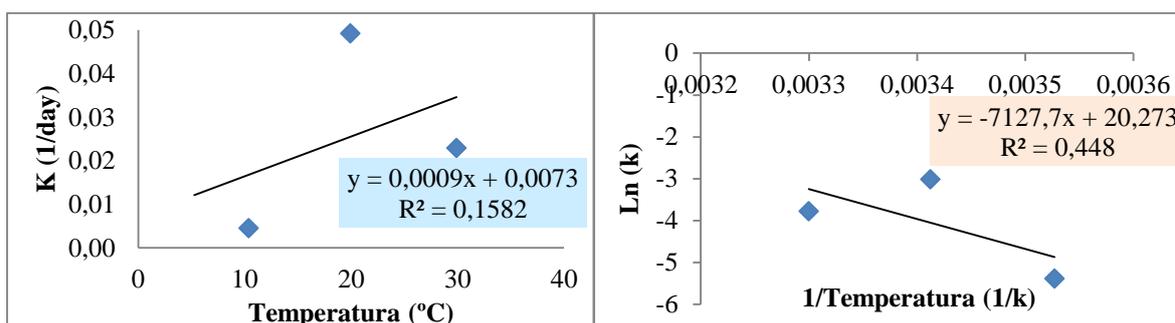


Figura 5.6 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A₆₀_SF

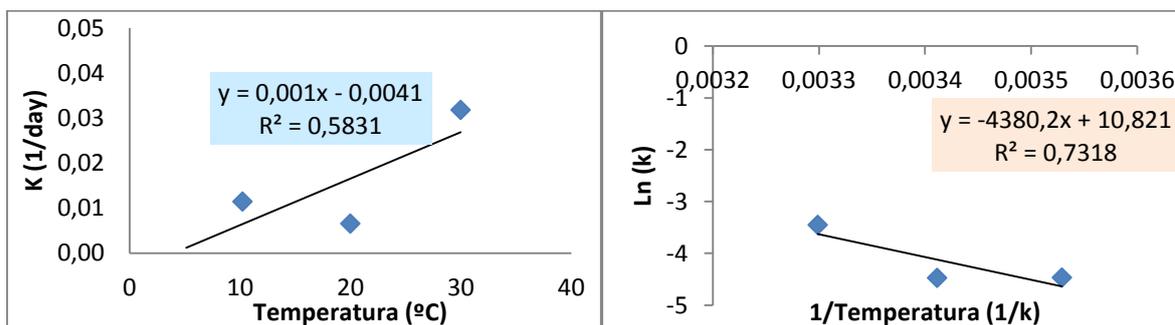


Figura 5.7 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A₁₀₀_FC

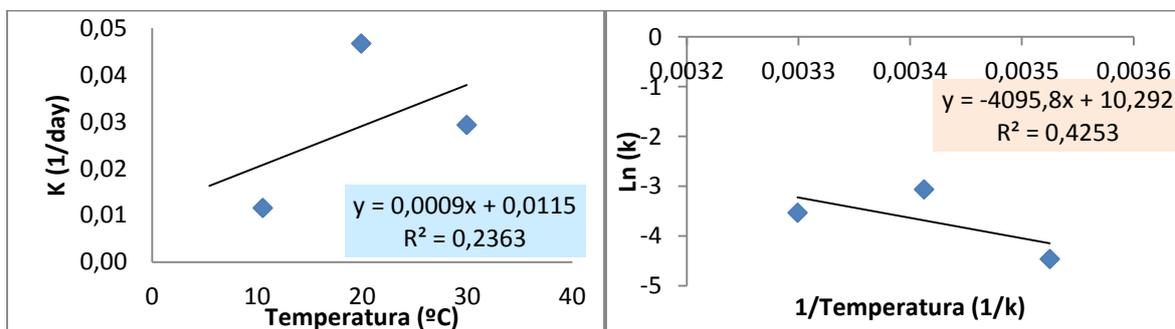


Figura 5.8 - Gráficos da T_0 e da E_a para a A₁₀₀_SF

Recorrendo ao gráfico da E_a retiramos o valor negativo da inclinação da linha, designado parâmetro Q, este dividido pela constante dos gases perfeitos, ($R=8.314 \times 10^3 \text{ J/ (K. mol)}$), dá o valor para a energia de ativação em kJ/mole (3). No Quadro 5.6 são apresentados os valores de Q.

Quadro 5.6 – Valores de Q extraídos dos gráficos.

	Q	E_a (kJ/mol)
A_60_FC	-5679	47,22
A_60_SF	-7127	59,26
A_100_FC	-4380	36,11
A_100_SF	-4095	34,04

$$E_a = Q \times 8.314 \times 10^{-3} \quad (3)$$

Os valores obtidos para a *datum temperature* revelam-se coerentes comparativamente com outros estudos realizados. Carino e Tank (1992) citado por Wade *et al.* (2006) recomendam as temperaturas indicadas no Quadro 5.7, com efeito da relação w/c , o tipo de cimento e adições utilizadas.

Na composição da argamassa A_60_FC foi utilizado cimento CEM II/A-L 42.5R e adição de fíler calcário e superplastificante acelerador de presa. A argamassa A_60_SF foi produzida com CEM II/A-L 42.5R com adições de sílica de fumo e fíler calcário e superplastificante acelerador de presa. Na mistura da argamassa A_100_FC foi utilizado cimento CEM I 52.5R e adição de fíler calcário com superplastificante acelerador de presa. Na produção da A_100_SF foi utilizado cimento CEM I 52.5R com adições de sílica de fumo e fíler calcário e superplastificante acelerador de presa. É apresentado no Quadro 5.8 a relação w/c das argamassas em estudo.

Quadro 5.7 - Datum Temperature (Wade *et al* (2006) citando Carino e Tank (1992))

<i>Datum Temperature</i> T_0 (°C)		
Cimento	w/c = 0.45	w/c = 0.60
CEM I	11	9
CEM II	9	6
CEM III	7	7
CEM I+ 20% Sílica de Fumo	5	0
CEM I + 50% Cinzas de Alto Forno	8	10
CEM I + Acelerador de presa	8	9
CEM I + Retardador de presa	5	5

Quadro 5.8 – Relação água-cimento das argamassas

	w/c
A_60_FC	0,45
A_60_SF	0,49
A_100_FC	0,31
A_100_SF	0,34

Os valores de *Datum Temperature* obtidos experimentalmente são coerentes, exceto para a A_100_FC que originou um valor muito reduzido em relação ao esperado. Verificaram-se nos ensaios da resistência à compressão aos 28 dias dos provetes de A_100_FC curados a 30°C, valores elevados quando comparados com as outras temperaturas, o que gerou uma elevada dispersão no gráfico do inverso do parâmetro k pela temperatura (Figura 5.9)), gerando uma reta de correlação dos pontos com um declive elevado. O valor T_0 obtém-se pela interseção desta reta com o eixo dos x.

Os valores da E_a obtidos revelam-se desajustados em relação ao expectável nas argamassas com resistência de 60 MPa, apresentam valores muito superiores aos que a bibliografia consultada (Quadro 5.9) prevê para argamassas com cimento CEM II 42.5R-A/L, que seria um valor da E_a próximo de 31,4 (kJ/mol).

Quadro 5.9 - Valores da energia de ativação (Peres et al.,2005)

Cimento	E_a (kJ/mol)
CEM I	35,4
CEM II-A/L	31,4
CEM II-A/P	31,3
CEM III	57
CEM IV	50,4
CEM V	43,9

Em termos de comparação com trabalhos idênticos de análise pelo método da maturidade, é importante referir os parâmetros obtidos por Marques (2012). Ao estudar um betão auto-compatível de elevado desempenho com cimento CEM I 52,5R, adições de sílica de fumo e fíler calcário, superplastificante acelerador de endurecimento e razão w/c de 0,3, obteve para a T_0 o valor de 3,1°C e para a E_a o valor de 45,3 kJ/mol.

5.2 Ensaios com BAC

Os provetes de betão foram monitorizados com recurso a um *datalogger* para garantir um registo contínuo das temperaturas experimentadas, paralelamente foram ensaiados à compressão os provetes cúbicos, de modo a estimar a semelhança entre a resistência do betão real e a resistência calculada pelo método da maturidade.

Foram ensaiados 3 provetes ao 1º, 3º, 7º, 28º e 56º dia de idade e 2 provetes ao 14º dia de idade. Em todos os ensaios foi visível a superfície de rotura, caracterizada por apresentar os ângulos que formam duas pirâmides resultantes do efeito de confinamento (Figura 5.13 a)). Nos betões de 100 MPa, devido à elevada carga de rotura, ocorreu rotura explosiva, projetando partículas de betão pelo laboratório (Figura 5.13 b)).

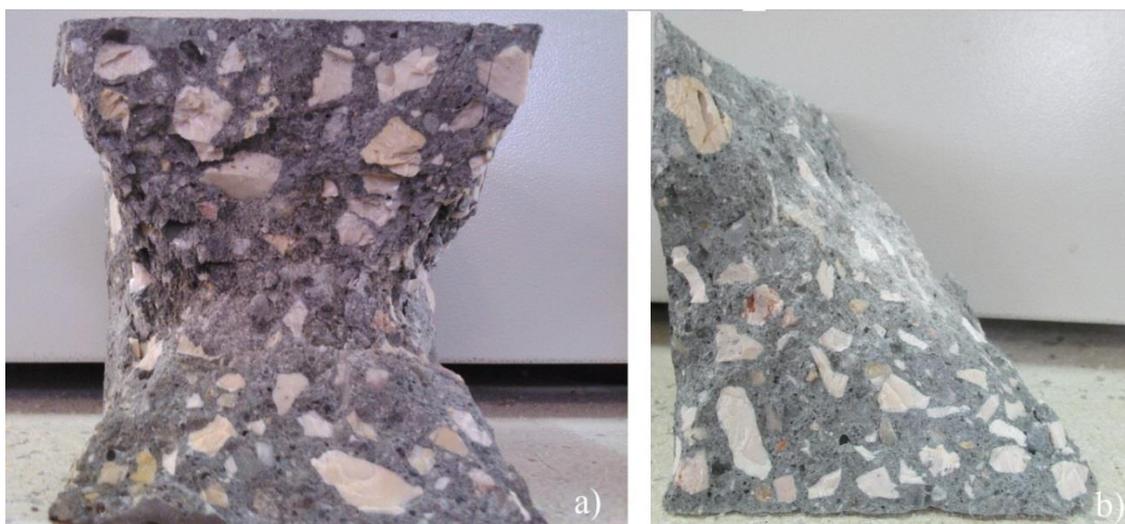


Figura 5.9 - a) Superfície de rotura típica do betão ; b) Superfície de rotura observada em betão de 100MPa

De seguida são apresentados, na forma de tabelas e de gráficos, os resultados dos ensaios realizados. No Quadro 5.10 são demonstrados os valores para os ensaios à rotura, no Quadro 5.11 apresenta-se o valor médio da resistência do betão, f_{cm} , e o desvio padrão, Δf_{cm} , dos resultados obtidos.

Quadro 5.10 - Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão.

Idade	B_60_FC (MPa)	B_60_SF (MPa)	B_100_FC (MPa)	B_100_SF (MPa)
24 horas	30,59	32,38	62,2	50,73
	31,7	33,93	63,3	48,4634
	31,65	34,54	57,8	46,14
3 dias	45,37	60,853	67,6	71,03
	47,17	53,69	67,8	67,75
	48,2		75,5	65,06
7 dias	59,7	65,645	71,9	79,02
	58,2	64,068	78,1	77,07
	56,2	65,8	77,4	82,98
14 dias	56	72,66	75,48	80,75
	59,7	68,2	78,93	91,09
28 dias	69,141	88,79	84,98	83,42
	60,041	71,96	82,56	94,85
	64,866		82,07	91,25
56 dias	72,99	94,1	100,15	108,97
	74,18	86,92	104,25	101,51
	69,14	90,01		104,84

Quadro 5.11 - Resistências médias dos ensaios à compressão, e respetivos desvios.

	B_60_FC		B_60_SF		B_100_FC		B_100_SF	
	f_{cm} (MPa)	Δf_{cm} (MPa)						
24 horas	31,65	0,63	33,93	1,11	62,20	2,91	48,46	2,30
3 dias	47,17	1,43	57,27	5,07	67,80	4,50	67,75	2,99
7 dias	58,20	1,76	65,65	0,96	77,40	3,40	79,02	3,01
14 dias	57,85	2,62	70,43	3,15	77,21	2,44	85,92	7,31
28 dias	64,87	4,55	80,38	11,90	82,56	1,56	91,25	5,84
56 dias	72,99	2,63	90,01	3,60	102,20	2,90	104,84	3,74

Ilustra-se graficamente na Figura 5.14 os resultados dos ensaios de resistência à compressão para os 4 betões apresentados no quadro anterior. A evolução da resistência em função da maturidade é perceptível desde as idades jovens, podendo ser observada na Figura 5.15.

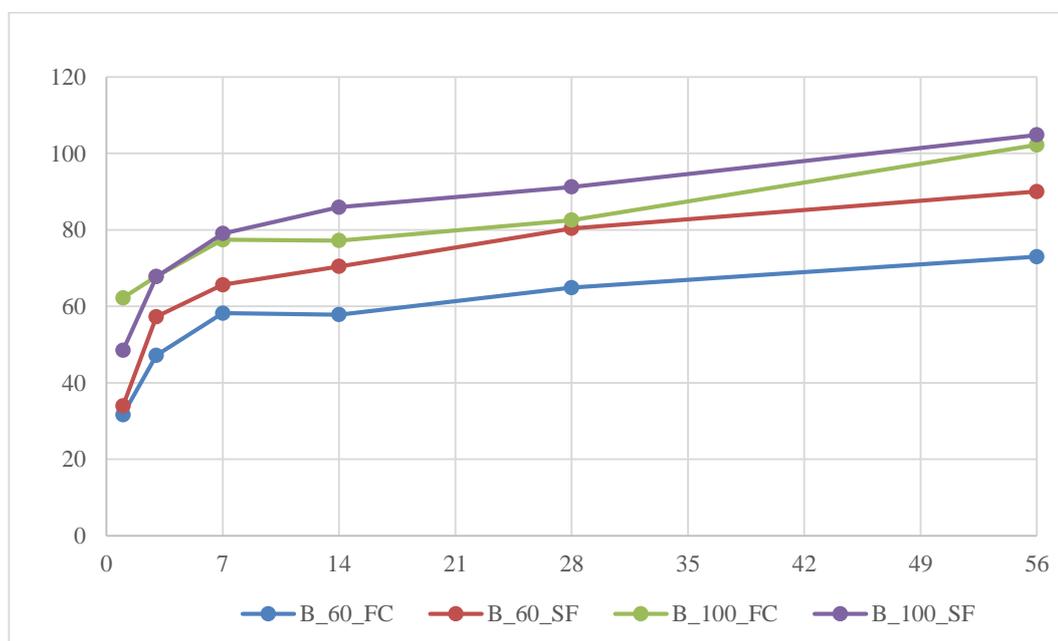


Figura 5.10 - Valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão.

Através da análise dos gráficos conclui-se que o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo da idade de cura semelhante em todos os tipos de betão.

Com a aplicação da linha de tendência é possível obter o valor de R^2 , que quando próximo da unidade, indica uma forte relação entre as duas variáveis. Esta relação foi revelada apenas para o betão B_100_FC, devendo-se ao rápido aumento de resistência nas idades iniciais, como exemplo no ensaio às 24 horas de idade os valores de resistência já eram aproximadamente 50 MPa, o que tornou o gráfico mais uniforme.

Nos gráficos seguintes é apresentada a evolução da maturidade dos provetes. Na Figura 5.15 pode observar-se a evolução do índice de maturidade ao longo do tempo de cura, enquanto a Figura 5.16 ilustra a evolução da idade equivalente em função do tempo de cura.

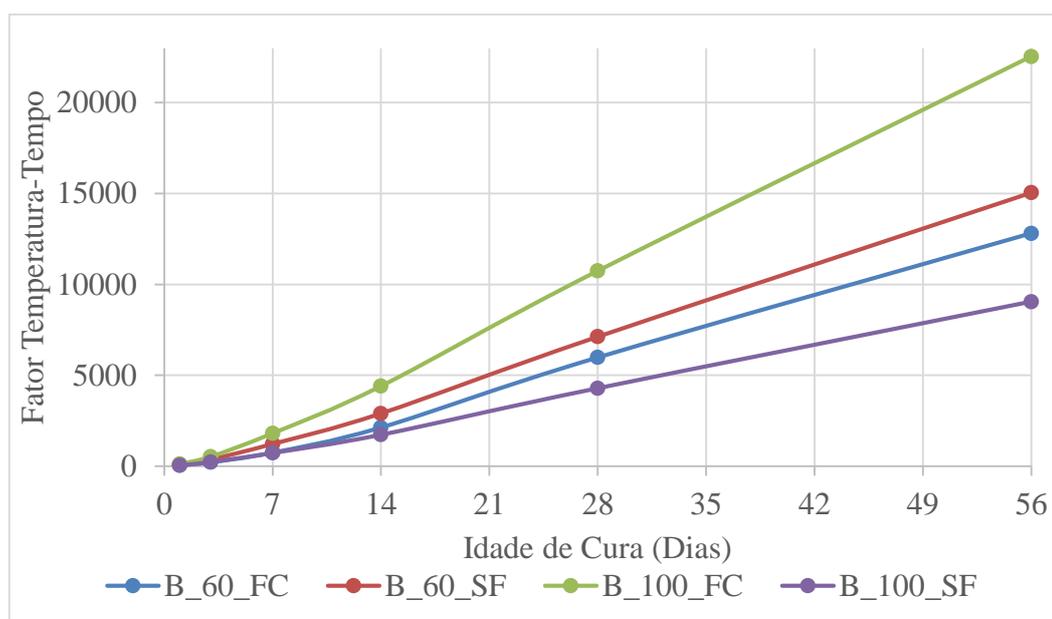


Figura 5.11 – Evolução da Maturidade ao longo da idade de cura.

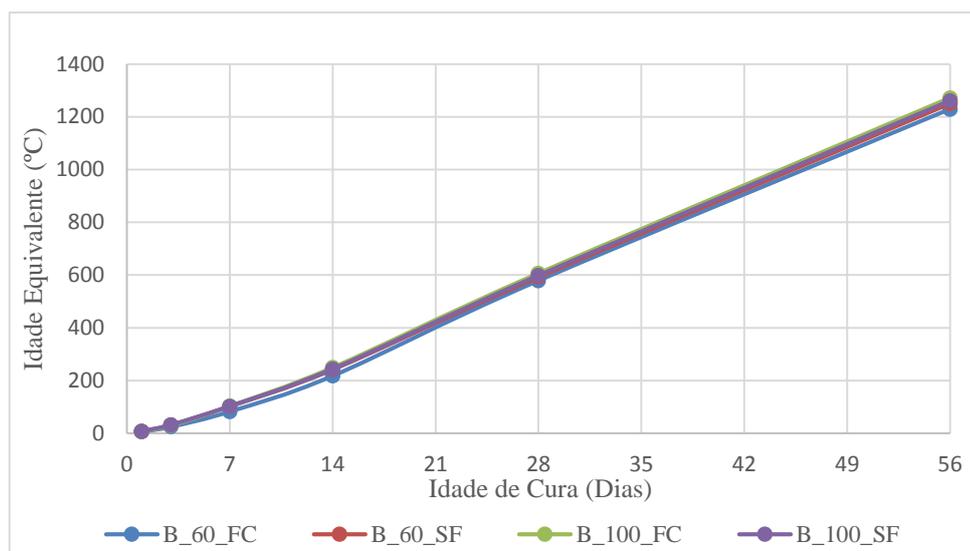


Figura 5.12 – Desenvolvimento da Idade Equivalente

A análise dos gráficos permite verificar que a evolução da maturidade do betão e o desenvolvimento da idade equivalente se deu de forma semelhante para todos os provetes. A curva da maturidade do betão B_100_FC destaca-se das restantes com valores muito elevados, como o índice de maturidade está diretamente relacionado com o valor da T_0 determinado, tendo-se obtido um valor que não é o expectável, quando comparado com a bibliografia consultada, este é o responsável pelo afastamento observado nesta curva. Segundo a bibliografia um betão CEM I-A/L com superplastificante retardador de presa e relação w/c de 0.45 deveria ter uma T_0 próxima de 5°C. É apresentado de seguida um gráfico da relação índice de maturidade/resistência onde a curva correspondente ao B_100_FC é calculada com base nos valores de T_0 obtido para o B_60_FC (9,5°C). Este gráfico permite comprovar a elevada influência da T_0 na evolução do índice de maturidade.

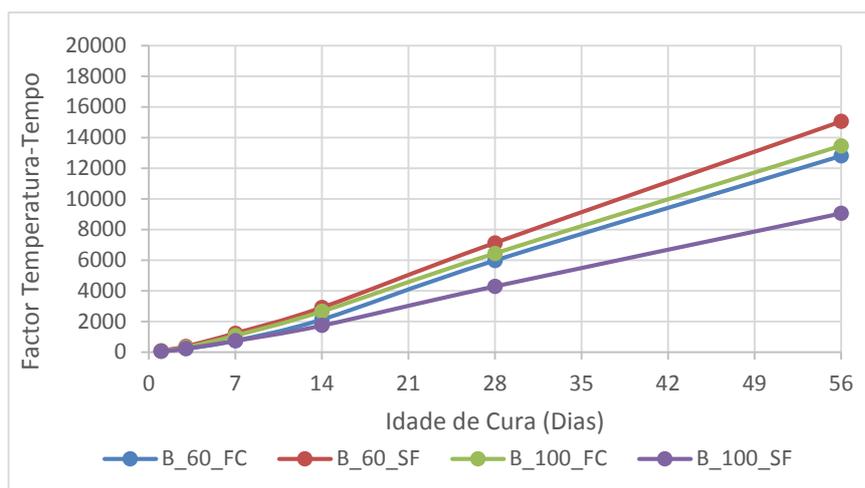


Figura 5.13 - Evolução da Maturidade ao longo da idade de cura, $T_0(B_{100_FC})=T_0(B_{60_FC})$

Na Figura seguinte apresenta-se o registo das temperaturas no interior dos provetes de betão ao longo do tempo de cura no tanque de água.

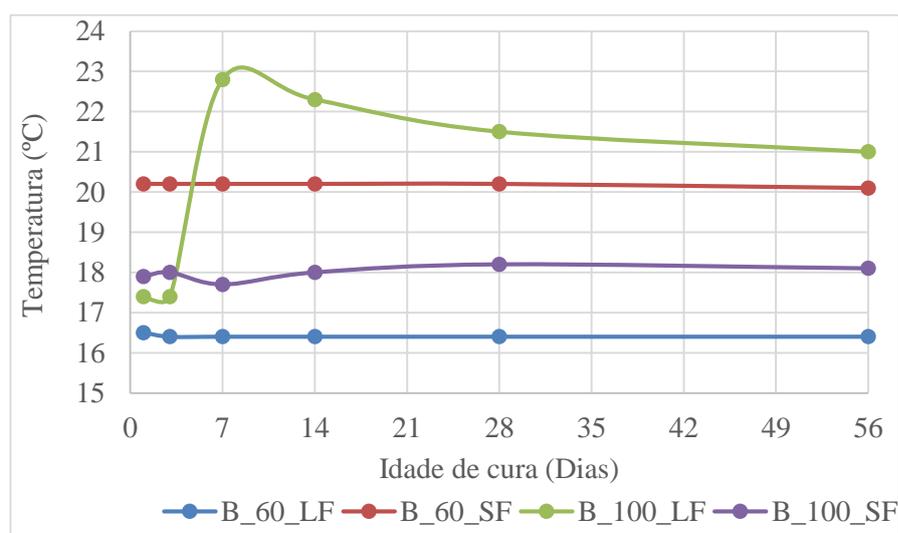


Figura 5.14 – Registo das temperaturas dos provetes de betão

O Quadro 5.12 indica os valores obtidos no cálculo do índice de maturidade, M_t , e do fator idade equivalente, t_e , de acordo com o tipo de betão.

Quadro 5.12 - Valores do índice de maturidade e da idade equivalente

Idade (dias)	B_60_FC		B_60_SF		B_100_FC		B_100_SF	
	M_t (°C-h)	t_e (°C-h)						
1	51,3	5,7	83,4	6,9	119,2	6,8	51,7	7,1
3	223,7	24,7	370,2	30,8	527,8	29,9	233,4	31,3
7	750,8	82,4	1226,2	101,9	1811,2	102,7	735,1	102,1
14	2132,4	217,7	2905,7	241,5	4407,6	249,1	1734,5	243,0
28	5981,8	579,0	7126,2	592,2	10742,7	606,3	4292,3	597,8
56	12806,6	1229,6	15052,3	1250,8	22536,4	1271,5	9054,2	1261,0

Com base nos valores do Quadro 5.12 e nos valores dos ensaios de resistência à compressão do Quadro 5.11 obtiveram-se os seguintes gráficos (Figura 5.15 a Figura 5.22).

Apresenta-se de seguida os gráficos que relacionam a evolução da maturidade com o desenvolvimento da resistência à compressão durante a idade de cura.

Para o betão B_60_FC:

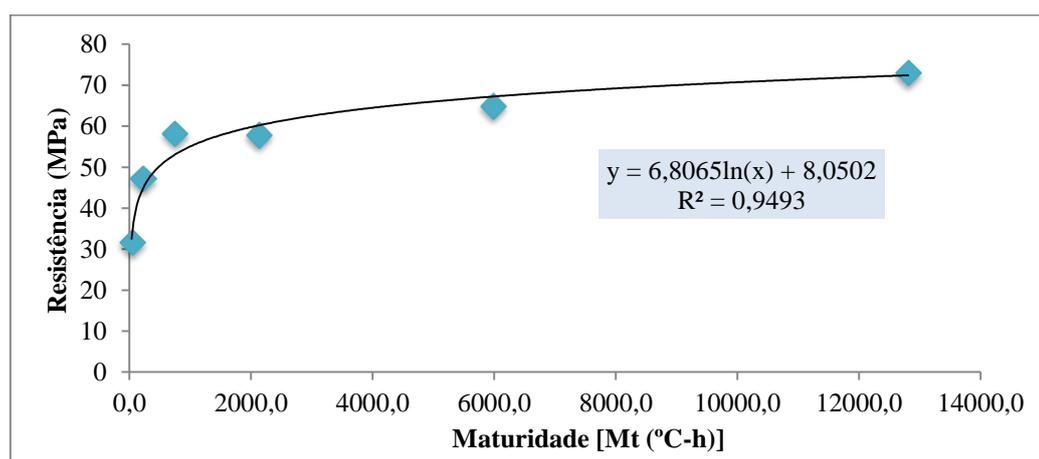


Figura 5.15 – Evolução da maturidade no B_60_FC

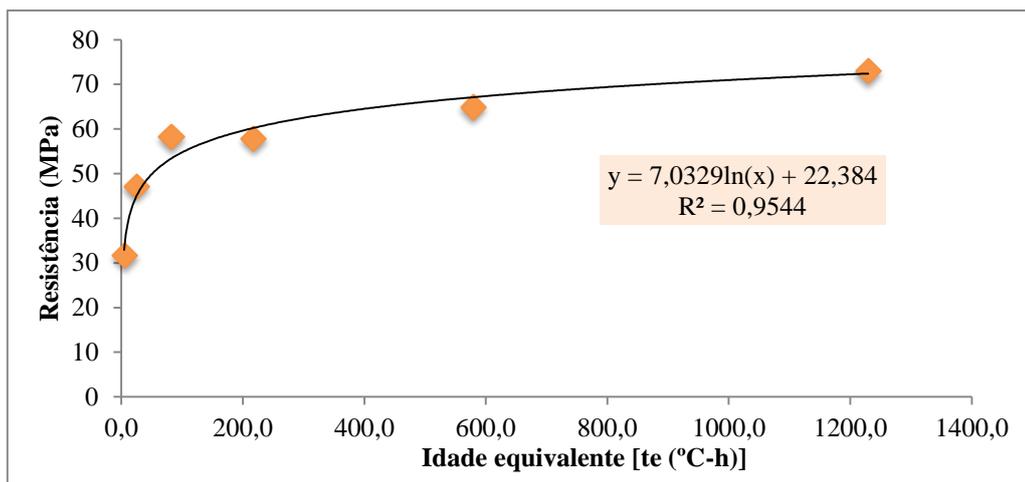


Figura 5.16 – Desenvolvimento da idade equivalente B_60_FC

Para o betão B_60_SF:

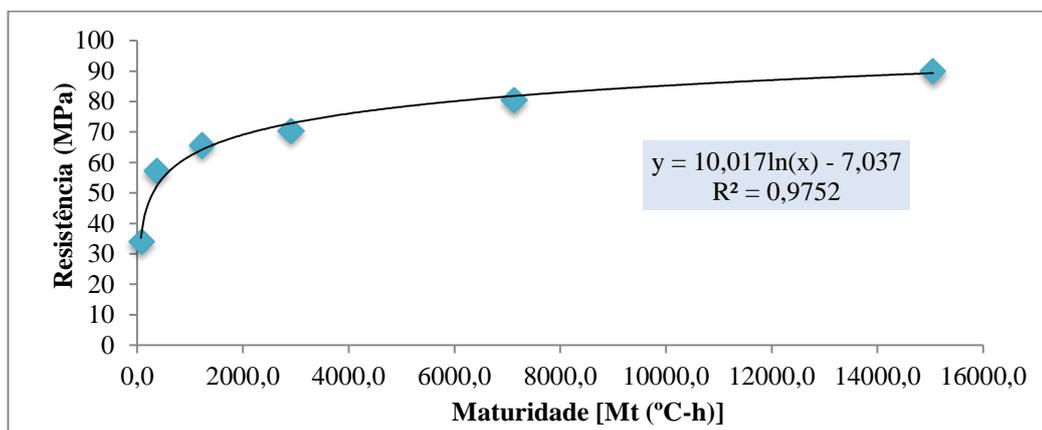


Figura 5.17 – Evolução da maturidade no B_60_SF

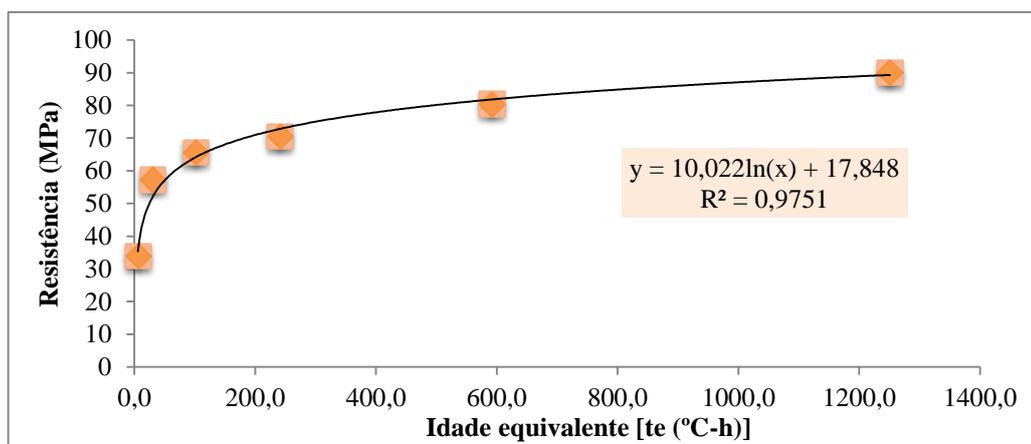


Figura 5.18 - Desenvolvimento da idade equivalente no B_60_SF

Para o betão B_100_FC:

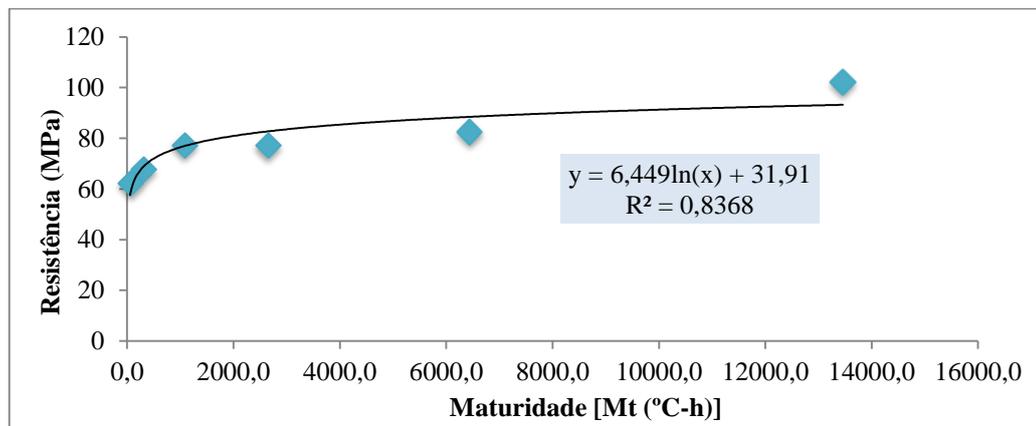


Figura 5.19 – Evolução da maturidade no B_100_FC

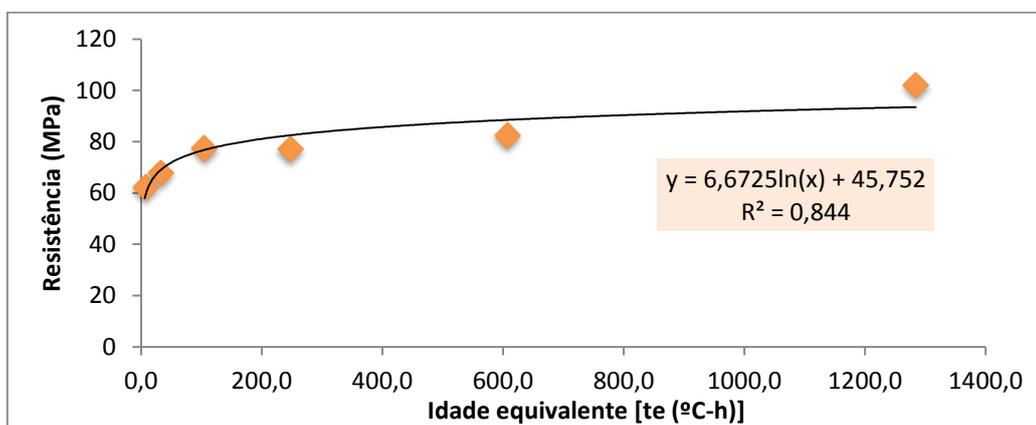


Figura 5.20 – Desenvolvimento da idade equivalente no B_100_FC

Para o betão B_100_FC:

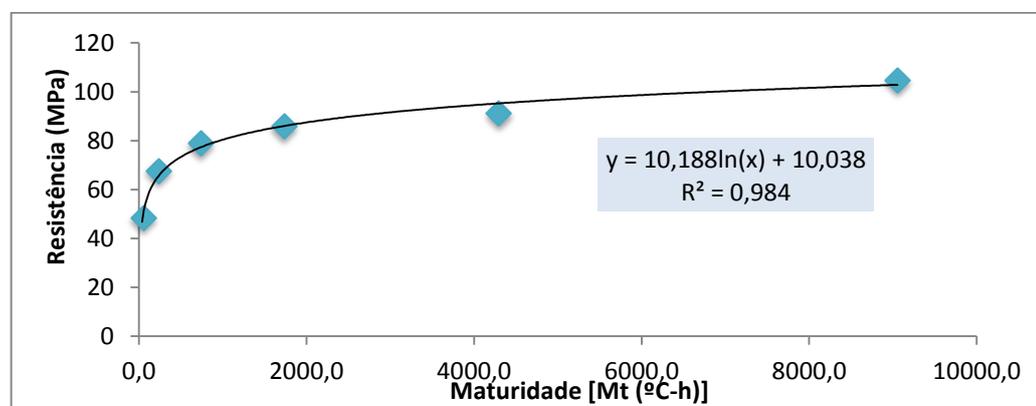


Figura 5.21 – Evolução da maturidade no B_100_SF

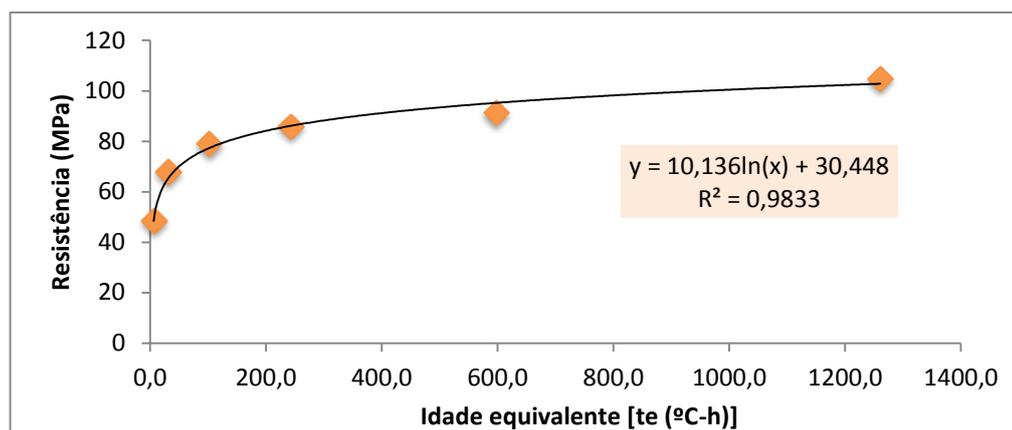


Figura 5.22 – Desenvolvimento da idade equivalente B_100_SF

Com o objetivo de estudar a influência do cimento e das adições nas misturas de betão foram criados os seguintes gráficos, Figura 5.23 e Figura 5.24. O primeiro gráfico demonstra a relação entre a resistência à compressão e o índice de maturidade em função do cimento utilizado nas misturas. A curva superior indica os betões com cimento CEM I 52.5R e a inferior representa os betões com cimento CEM II 42.5R.

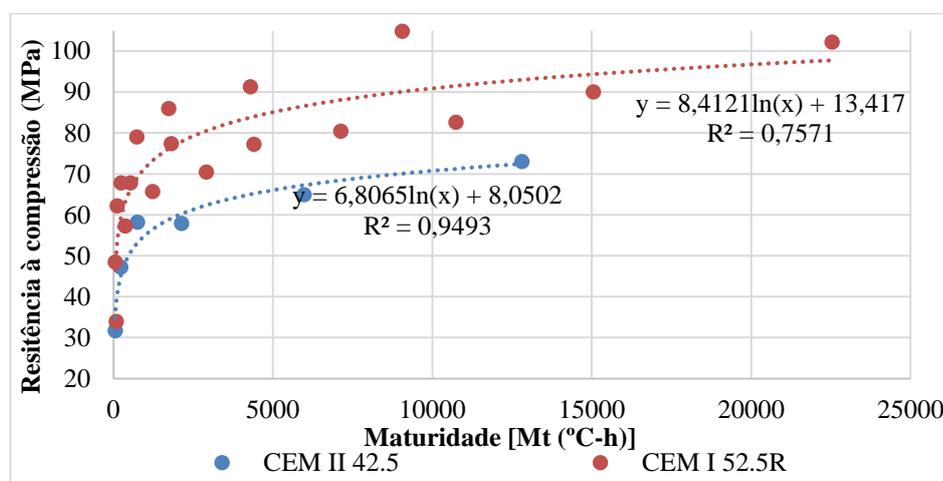


Figura 5.23 - Relação Resistência/Maturidade em função do cimento

É apresentado de seguida o gráfico que representa a relação da resistência à compressão pela maturidade em função das adições introduzidas nos betões. Num grupo de pontos são representados os betões com adição de sílica de fumo, noutro grupo os valores para as misturas com fíler calcário.

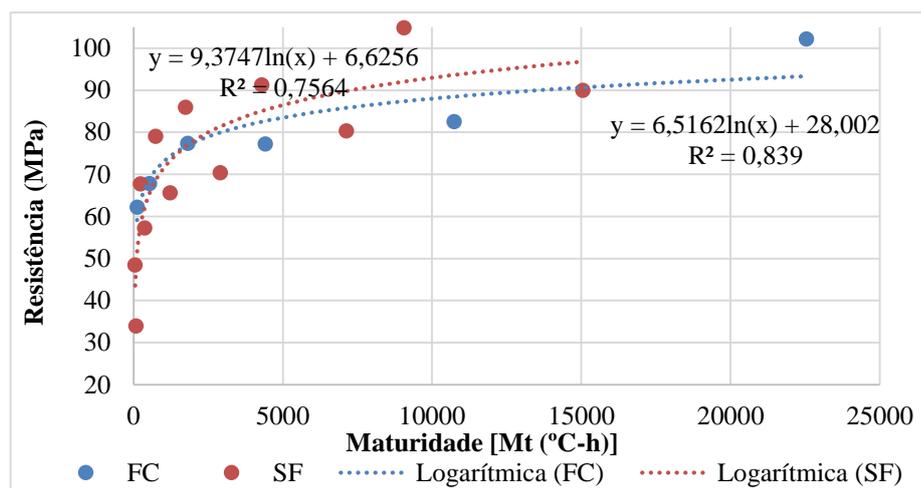


Figura 5.24 - Relação Resistência/Maturidade em função da adição

Verificam-se valores elevados para a curva de tendência logarítmica função do tipo de cimento, mas as curvas são distintas, evidenciando diferenças significativas quanto ao desenvolvimento da resistência e do índice de maturidade.

Na curva de tendência logarítmica função das adições utilizadas, é obtida também uma boa aproximação com valores de R^2 próximos da unidade, contudo as curvas tem comportamento idêntico, revelando que a adição utilizada na mistura não cria grandes diferenças na evolução da resistência, ou seja, não é tão preponderante para o desenvolvimento da resistência e da maturidade. De destacar que a curva de tendência que segue os pontos de misturas com sílica de fumo, tem um desenvolvimento superior após as idades iniciais, enquanto as misturas com filer calcário, têm inicialmente resistência comparativamente superior e estagnam ligeiramente o desenvolvimento.

6. CONCLUSÕES

O método da maturidade permite a determinação da resistência à compressão do betão em elementos estruturais *in situ*, sem a realização de ensaios destrutivos, necessitando apenas do registo das temperaturas no interior do betão e de parâmetros obtidos em laboratório através de ensaios.

O presente trabalho apresentou a análise pelo método da maturidade de betões com características distintas do BC, o BAC de elevado desempenho, com diferentes escalões de resistência mecânica.

Para a aplicação do método da maturidade foi necessário a monitorização das temperaturas, um processo fácil e que se revelou com aproximações da resistência estimada muito próximas da resistência caracterizada experimentalmente.

Foram estudados 4 tipos de betão, com duas gamas de resistência prevista aos 28 dias, com duas séries de adições, uma de fíler calcário e outra com a combinação deste com sílica de fumo.

Conclui-se então, que é possível relacionar o índice de maturidade do betão com o desenvolvimento da resistência com excelentes resultados, provando a aplicabilidade deste método em casos práticos.

Para a determinação dos parâmetros do método da maturidade, foram produzidas argamassas baseadas nas proporções dos constituintes dos betões, e expostas a três temperaturas de cura (10°C , 20°C e 30°C).

Numa análise geral, os valores obtidos para a *datum temperature* e energia de ativação enquadram-se na gama esperada, exceto pontualmente para algumas amostras.

Após as idades iniciais, as misturas que integram adições de sílica de fumo tem uma evolução de resistência superior, quando comparadas com outras adições.

As temperaturas de cura mais baixas (10°C), provocam uma redução da velocidade de reação de hidratação, prolongando-a ao longo do tempo.

Pelos resultados obtidos, o tipo de adição utilizada na mistura não gera alterações significativas na evolução da resistência, provando que não é tão importante no desenvolvimento da resistência e da maturidade como é o tipo de cimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C 1074., (2004), *Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*, Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia: American Society for Testing Materials.
- Barbosa, M. P., Pinto, R. C. A., Lazari, C. R., Salles, F. M., (2005), *O Método da Maturidade na Determinação da Resistência à Compressão do CAD Produzido com Seixo Rolado*, São Carlos 2005.
- Carino, N. J., e Tank, R. C., (1992). *Maturity Functions for Concretes Made with Various Cements and Admixtures*. ACI Materials Journal, Vol.89, No.2, March-April, pp.188-196.
- Carino, N. J., Lew, H.S. (2001). *The Maturity Method: From Theory to Application*, Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C.Chang, Editor.
- Costa, H., Júlio, E., Lourenço, J. *Mixture-design and Characterization of Self-compacting Lightweight Aggregate Concrete*. SCC2010 6th Int. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete - 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, Montreal, Quebec - Canada. 2010.
- Couto, A., e Couto, J. P., (2008), *Contribuição Da Prefabricação Para a Sustentabilidade e Competitividade do Sector da Construção*, 2ª Congresso Nacional da Prefabricação Em Betão
- ERMCO, (2005), *European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*.

- Hoffman, A. T., (2001) Influência da adução de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- Kim, J.K., Han, S. H., e Lee, K. M., (2001), *Estimation of compressive strength by a new apparent Activation energy function*, Cement and Concrete Research, Vol.31, No.2, pp.217-225.
- Kosmatka S. H., Kerkhoff B., Panarese W. C. (2003). *Design and Control of Concrete Mixtures*. FOURTEENTH EDITION, Portland Cement Association. USA
- Ouchi, M., (1999), *Self-Compacting Concrete*, Department of Infrastructure Systems Engineering, Kochi University of Technology, Kochi 782-8502, Japão.
- Ouchi, M., (2001) *Self-compacting concrete: development, applications and key technologies*, Kochi University of Technology, Japan.
- Okamura H., Ozawa K., Ouchi M. (2000). Self Compacting Concrete. Structural Concrete, Volume 1, Issue 1, 01 March 2000, 3 –17pp
- Okamura, H., e Ouchi, M., (2003), *Self-Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol.1, No.1.
- Malhotra, V. M., Carino, N. J., (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Second Edition, CRC Press LLC. USA.
- Marques, L. F. S. (2012). *Aplicação do método da maturidade a betões auto-compactáveis de elevado desempenho*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, FCTUC- Departamento de Engenharia Civil, Coimbra. 62pp.
- Nurse, R. W., (1949), *Steam curing of concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol.1, No.2.

- Pereira, J. P. (1999), *Avaliação da Resistência à Compressão do Betão Através de Ensaios Não-Destrutivos*, Tese de Mestrado de Engenharia Civil, FCTUC - Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- Peres, L.D.,Barbosa, M. P., Pinto, R. C. A. (Novembro, 2005). Aplicação do Método da Maturidade na avaliação da resistência à compressão de peças pré-moldadas. *1º Encontro Nacional de Pesquisa - Provetec - Produção em Concreto Pré-Moldado*, São Carlos 2005.
- Saul, A. G. A., (1951), *Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure*, Magazine of Concrete Research, Vol.2, No.5, March, pp.127-140.
- Skarendahl, A., e Petersson, Ö., (2000), *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art*, Report of RILEM Technical Committee 174, RILEM, France.
- Tank, R.C., e Carino, N. J., (1991) *Rate constant functions for strength development of concrete*. ACI Materials Journal, Vol.88, No.1, January-February.
- Thrane L. N , (2007) *Form Filling with Self-Compacting Concrete*, Ph.D. Thesis, Concrete Centre, Danish Technological Institute
- Wade S. A., Schindler A. K., Barnes R. W., Nixon J. M. (2006). *Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength*. Highway Research Center And Department of Civil Engineering at Auburn University, May 2006.
- Walraven, J., (2003) *Strutural Aspects of Self Compacting Concrete*, 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM, France
- Zhang, J., Cusson, D., Monteiro, e Harvey, J., (2008), *New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications*, Cement and Concrete Research, Vol.38, No.12, pp.1438-1446.