

MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES: UM NOVO MÉTODO EXPERIMENTAL BASEADO NO AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO INTERNO

EARLY AGE MEASUREMENT OF THE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF CONCRETE: A NEW TEST SETUP BASED ON INTERNAL HEATING/COOLING

Zahabizadeh, Behzad; *Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ISISE, Guimarães, Portugal, b.zahabizadeh@gmail.com*

Edalat-Behbahani, Ali; *Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ISISE, Guimarães, Portugal, aliedalatbehbahani@gmail.com*

Gomes, José; *Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ISISE, Guimarães, Portugal, jose89gomes@gmail.com*

Granja, José; *Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ISISE, Guimarães, Portugal, granja@civil.uminho.pt*

Faria, Rui; *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, CONSTRUCT, Porto, Portugal, rfaria@fe.up.pt*

Azenha, Miguel; *Escola de Engenharia da Universidade do Minho, ISISE, Guimarães, Portugal, Miguel.azinha@civil.uminho.pt*

RESUMO

Um dos fatores que influencia a durabilidade das estruturas de betão armado é o aparecimento de fendas nas primeiras idades devido às tensões internas que se geram por restrição de deformações térmicas durante a cura. A sensibilidade da deformação térmica do betão, representada pelo coeficiente de dilatação térmica (CDT), é uma propriedade que se altera durante as primeiras idades, devido às modificações micro-estruturais que ocorrem durante a hidratação do cimento. O conhecimento da evolução do CDT nas primeiras idades é fundamental para uma correta previsão das extensões e tensões internas que se geram logo após a presa do betão. Neste trabalho é apresentado um método integrado para determinar a evolução do CDT de provetes de betão desde idades anteriores à finalização da presa, ultrapassando deste modo as principais limitações dos métodos atualmente utilizados para determinação deste coeficiente em materiais cimentícios. O método proposto consiste na exposição de um provete de betão a ciclos de variações térmicas de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$, tendo-se desenvolvido um molde de ensaio que permite a leitura da resposta do provete durante as primeiras idades. As variações térmicas são impostas através da imersão do molde de ensaio em água, a temperatura controlada, e impondo a circulação dessa água no interior do provete através de um tubo em espiral embutido, permitindo desta forma reduzir o gradiente de temperatura entre a superfície e o núcleo e, conseqüentemente, o tempo de duração dos ciclos térmicos. No presente trabalho são testadas diferentes composições de betão para verificar a aplicabilidade do método proposto para determinação do CDT do betão nas primeiras idades, tendo-se obtido resultados que estão em acordo com o atual estado da arte.

Palavras-chave: Coeficiente de dilatação térmica, deformação térmica, retração autógena.

ABSTRACT

One of the factors influencing the durability of reinforced concrete structures is the occurrence of cracking during the early ages, caused by the internal stresses generated by restrained thermal deformations during cement hydration. Thermal deformation sensitivity, represented by its coefficient of thermal expansion (CTE), is a property that changes during early ages due to, essentially, micro-structural changes that occur during cement hydration. Knowing the evolution of the CTE since early ages is essential for a correct prediction of the internal stresses that occur right after setting of the concrete. In this work, an integrated method for determination of concrete CTE evolution during the early ages is proposed, in which the main limitations of the current methods are circumvented. The proposed method consists in exposing a concrete specimen to thermal variations of $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$, and a test rig that enables measuring the specimen's response to those thermal variations since early ages. The thermal variation is imposed by immersing the concrete specimen in a water bath, with controlled temperature, and imposing water circulation inside the specimen through an embedded spiral tube. This allows reducing the difference between the surface and the core temperatures, and so minimizing the duration of thermal cycles. In the present work several concrete compositions are tested in order to verify the applicability of the proposed method for determination of concrete CTE in early ages, being observed that the results are in accordance with the current state of the art.

Key-Words: Coefficient of thermal expansion, thermal strain, autogenous shrinkage.

1 - INTRODUÇÃO

O coeficiente de deformação térmica (CDT) do betão é definido como o quociente entre a deformação de origem térmica e a variação de temperatura que lhe dá origem (AASHTO-T336, 2011, ASTM C531, 2012). Uma vez que as tensões desenvolvidas no betão nas primeiras idades estão fortemente relacionadas com a restrição de deformações térmicas, o CDT do betão é uma das propriedades mais importantes na avaliação do risco de fendilhação nas primeiras idades (Bjontegaard et al., 2004, Crawford et al., 2010, Siddiqui e Fowler, 2015, Zhutovsky e Kovler, 2017).

Ao longo dos últimos anos, vários autores têm realizado ensaios experimentais para determinar o CDT de materiais cimentícios nas primeiras idades (Kada et al., 2002, Myers et al., 2015, Naik et al., 2011, Ji et al., 2015, Maruyama e Teramoto, 2011, Heum et al., 2013, Crawford et al., 2010) e parece haver algum consenso em relação ao facto de o valor do CDT do betão diminuir durante as primeiras horas de cura (normalmente até às 24h), até atingir um valor mínimo que se mantém relativamente constante após esse período (Cusson e Hoogeveen, 2006, Bjontegaard e Sellevold, 2001, Delsaute, 2016). No entanto, as matrizes cimentícias com relação água-cimento (w/c) baixas tendem a apresentar comportamentos mais complexos, uma vez que a diminuição da humidade interna nos poros da matriz devida à autodissecação pode levar a um aumento do valor do CDT após o período inicial de cura (Sellevold e Bjontegaard, 2006, Wyrzykowski e Lura, 2013, Delsaute et al., 2016). É por isso de elevada importância a caracterização da evolução do CDT nas primeiras idades, a fim de possibilitar a previsão de tensões devido ao aumento do CDT nas primeiras idades (comparativamente com o pressuposto de que o valor do CDT é constante).

Os ensaios experimentais para determinação do CDT de materiais cimentícios atualmente existentes dividem-se essencialmente em dois tipos: ensaios volumétricos e ensaios lineares. Em ambas as abordagens existem vantagens e desvantagens. De uma forma geral, o ensaio volumétrico consiste em submergir um provete num reservatório com um líquido de densidade conhecida e determinar a variação de volume através da pesagem hidrostática (Wyrzykowski e Lura, 2013, Loukili et al., 2000). Esta técnica tem como vantagem a possibilidade de medir o CDT antes do ganho de presa do provete, mas o método é apenas aplicável a pastas de cimento e argamassas, devido à necessariamente reduzida dimensão dos provetes inerente a este tipo de ensaio (Loser et al., 2010). O ensaio linear, por sua vez, tem sido usado com sucesso para determinar o CDT de betão, baseando-se na medição da variação de comprimento de provetes sujeitos a uma variação de temperatura controlada (Zhang et al., 2015, Delsaute, 2016, Crawford et al., 2010, Siddiqui e Fowler, 2015, Zhutovsky e Kovler, 2017). Na maioria dos ensaios com esta abordagem o provete tem de ser descofrado, o que implica que o valor do CDT apenas é determinado para idades após o ganho de presa (Siang, 2017) e apesar de existirem exceções, tais como o método BTJADE (Boulay, 2012, Delsaute et al., 2016), a dimensão do provete é também limitada nesses casos. Quando se consideram provetes de maior dimensão para ensaio de betões normais, com máxima dimensão do agregado até 30mm, os tempos dos ciclos de temperatura aumentam, devido a uma maior inércia térmica, diminuindo a capacidade desta abordagem para determinar o CDT nas primeiras idades (Delsaute et al., 2016).

Recentemente Azenha et al. (2014) propuseram um método baseado nos ensaios lineares para caracterizar o CDT do betão nas primeiras idades. Pretende-se com este método superar as imitações acima descritas, relativas aos métodos já reportados na literatura. Para tal, foi desenvolvido um sistema de ensaio que permite submeter um provete de betão com 154mm de diâmetro e 300mm de altura a ciclos de temperatura de curta duração (fases de aquecimento/arrefecimento com duração de 1.5h) e amplitude pré-definida (5°C) em torno de uma temperatura média de 20°C, através da circulação de água no interior de 4 tubos embebidos no provete, que se encontra imerso num reservatório com água a temperatura controlável. Apesar da capacidade demonstrada pelo sistema desenvolvido em estabilizar a temperatura do provete num curto período de tempo, foram identificadas algumas limitações, nomeadamente: (i) a restrição à deformação térmica provocada pelo molde rígido e pelos tubos embebidos no betão para circulação da água e (ii) a incapacidade do sensor (extensómetro de cordas vibrantes embebido no provete) em registar a deformação do provete (deformação longitudinal) antes do ganho de presa.

O presente artigo tem como objetivo propor um novo método para determinar o CDT do betão nas primeiras idades, baseado no trabalho inicial de Azenha et al. (2014), com um sistema de ensaio refinado de forma a ultrapassar as limitações descritas. O método proposto e a configuração do ensaio são descritos na Secção 2. É ainda apresentada na Secção 3 uma campanha experimental realizada em provetes com diferentes composições, em que a evolução do CDT desde as primeiras idades é

determinada através do novo método proposto neste artigo, tendo como objetivo a validação do mesmo. Na Secção 4 são apresentadas as principais conclusões dos resultados obtidos.

2 - PROPOSTA DE ENSAIO PARA MEDIÇÃO DO CDT

2.1 - Introdução

Nesta secção é descrito um método de ensaio no qual um provete é submetido a ciclos de temperatura suficientemente pequenos para captar a evolução do CDT nas primeiras idades. A utilização de amostras de pequena dimensão é uma estratégia que limita a aplicabilidade do método relativamente a composições reais de betão, pelo que no novo método aqui proposto são utilizados provetes cujas dimensões têm a mesma ordem de grandeza das que são normalmente utilizadas para caracterização das propriedades mecânicas. Para tal, é embebido um tubo em espiral no provete, permitindo a circulação de água (a temperatura regulável) e consequente estabilização rápida da temperatura no seu interior.

O método para determinação do CDT consiste na instrumentação simultânea de dois provetes, um com ciclos aquecimento/arrefecimento e outro com temperatura constante, de forma a determinar isoladamente a deformação térmica e autógena do betão.

Em ambos os provetes são utilizados moldes de PVC flexível em forma de fole. Esta estratégia, inspirada nos trabalhos de Boulay (2012) e Delsaute (2016), elimina a restrição associada a moldes mais rígidos e permite a deformação livre do provete durante o ensaio. O molde adotado tem altura de 300mm, espessura de 1.5mm e diâmetros mínimo/máximo de 150mm/200mm. Para que o material a testar possa ser considerado homogéneo, o diâmetro do provete deverá ser, pelo menos, 4 vezes superior à máxima dimensão do agregado (ISO1920-10, 2010). Tendo em conta o diâmetro mínimo do provete (150mm), o método aqui proposto permite testar composições de betão reais com valores de máxima dimensão de agregado até 37mm.

A deformação do provete é medida com um LVDT, permitindo a aquisição de resultados a partir dos primeiros instantes após betonagem. Com efeito, a utilização de um extensómetro embebido implicaria ter de esperar pelo ganho de presa até se obterem leituras fidedignas.

2.2 - Procedimentos e configuração do ensaio

A Figura 1 apresenta os diferentes componentes do equipamento de ensaio (excluindo o sistema para imposição de ciclos térmicos), legendados alfabeticamente de 'a' a 'l'. A base do molde 'a' é fixada na parte superior da base metálica 'b' com uma abraçadeira de 150mm de diâmetro. Um furo com 10mm de diâmetro na base permite a passagem do tubo em espiral 'c' pela base metálica. Nesta base são fixados 3 varões de invar 'd', posicionados à volta do molde com um ângulo de separação de 120°. A opção do invar (designado por 36Ni63Fe) para materializar os varões de suporte da estrutura metálica deve-se ao seu baixo CDT ($1.5\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$), minimizando os efeitos da temperatura e consequentes erros associados à respetiva compensação. A forma elíptica do tubo em espiral 'c' é moldada através da amarração de fios de nylon à volta de um tubo de plástico com diâmetros interno e externo de 8mm e 10mm, respetivamente, e um comprimento total de 1495mm. A parte superior do molde tem uma aba com 4 furos que é fixada entre o anel 'e' e uma chapa 'f' com as porcas 'g'. A chapa 'f', que é usada para posicionar o tubo em espiral dentro do molde, é fixada aos varões de invar durante a betonagem através de 3 anéis de posicionamento 'h', que são desapertados imediatamente antes do início da aquisição de dados para permitir a livre deformação do provete. Posicionou-se um sensor de temperatura PT100 'i' no centro do provete para medir as variações de temperatura no núcleo. Ensaio piloto demonstraram que o molde de PVC sofre deformações significativas durante a betonagem devido ao peso do betão, sendo necessário amarrar 6 tiras de aço à sua volta para conferir uma maior estabilidade à geometria do molde durante o processo de colocação de betão. Após betonagem e vibração (em mesa vibratória), a chapa 'j', que possui um furo para passagem do tubo em espiral e um varão saliente para ficar em contacto com o LVDT 'k', é fixada à chapa 'f' e uma chapa com formato tríplice 'l' é fixada no topo dos varões de invar, servindo de suporte ao LVDT 'k'.

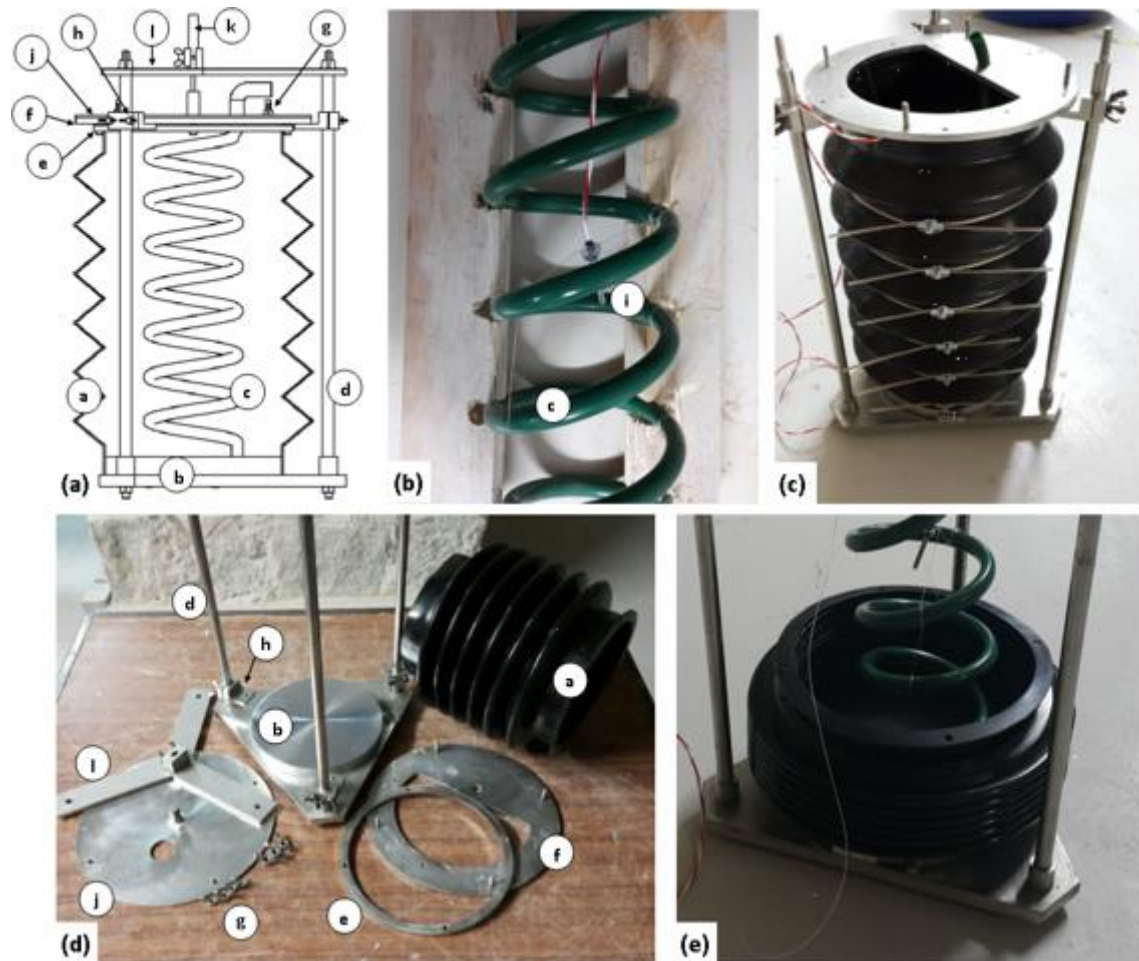


Figura 1 - Equipamento de ensaio: (a) representação esquemática do molde e estrutura de suporte; (b) Tubo em espiral para circulação de água no provete; (c) molde antes da betonagem; (d) componentes da estrutura de suporte; (e) posição do tubo em espiral dentro do molde.

Após betonagem e montagem dos componentes do equipamento de ensaio, este é colocado dentro de um reservatório com água, que é cheio até meia altura do varão saliente na chapa 'f' de forma a assegurar, simultaneamente, que o provete está completamente submerso e que o LVDT não fica em contacto com a água. O tubo em espiral passa pelas chapas 'f' e 'j' e é ligado à bomba 1 (Figura 2), responsável pela circulação da água do reservatório no interior do provete, através de um joelho e uma mangueira (Figura 3).

O sistema para imposição dos ciclos térmicos está representado na Figura 2. A temperatura da água a circular no interior do provete é regulada através de um controlador *Grant Optima™ TX150*, recorrendo ao software *LabWise* (Scientific, 2012). Este controlador possui uma resistência elétrica dentro do reservatório para aumentar a temperatura da água, e um relé programável que permite o controlo do sistema de arrefecimento.

O controlador é programado para definir ciclos consecutivos de aquecimento/arrefecimento com duração de 3h por ciclo. A fase de aquecimento consiste num período de aumento da temperatura da água (de 17.5°C até 22.5°C) que dura 5 minutos, seguida de um período isotérmico com duração de 85 minutos. Após esta fase a resistência elétrica do controlador é desativada, sendo ativado o relé que por sua vez permite o controlo do sistema de arrefecimento. Nesta fase, enquanto a temperatura da água (medida através de um sensor de temperatura no interior do reservatório e ligado ao termostato) for superior a 17.5°C, a bomba 2 é ativada pelo circuito elétrico, fazendo circular a água entre o reservatório e a máquina de refrigeração. Esta fase de arrefecimento é composta por um período de diminuição de temperatura (de 22.5°C até 17.5°C) com duração de 5 minutos, seguida de um período isotérmico de 85 minutos.

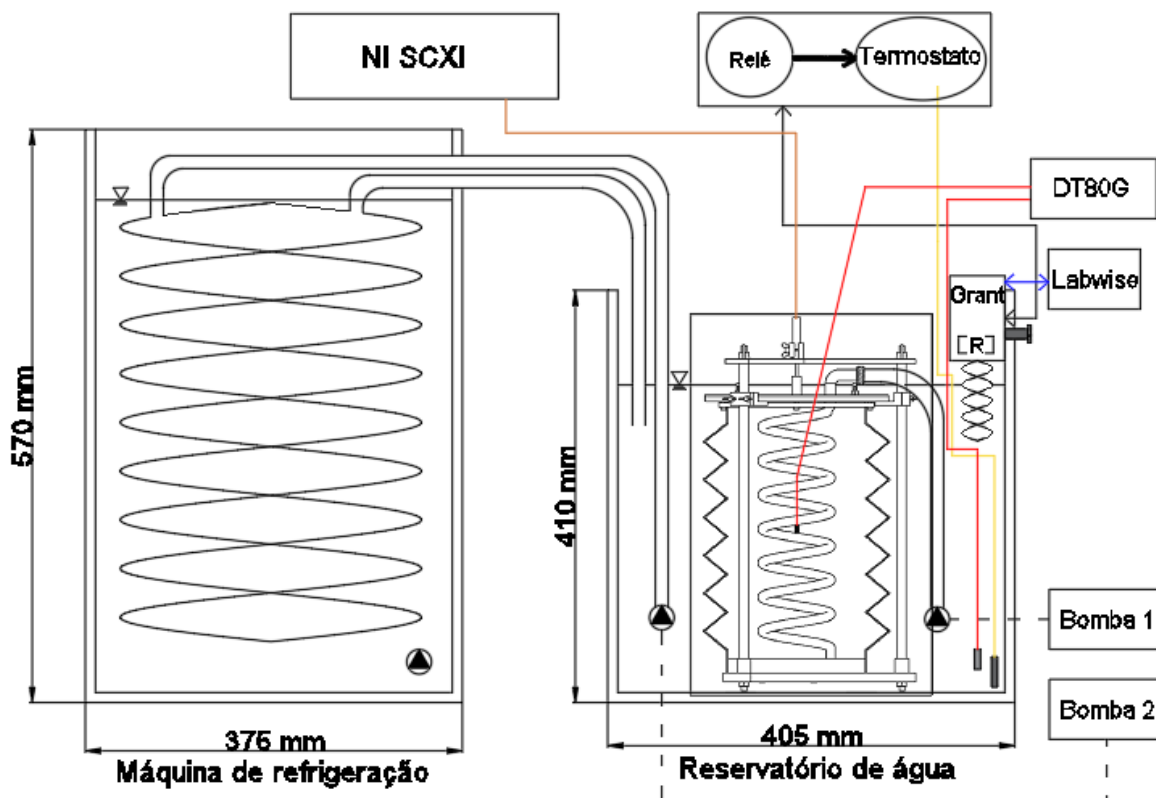


Figura 2 – Esquema do sistema para imposição dos ciclos térmicos.



Figura 3 – Pormenor da ligação do tubo em espiral com a bomba.

Paralelamente ao ensaio do provete sujeito a variações de temperatura ($\text{Teste}_{\text{CDT}}$), é ensaiado um provete para determinação da deformação autógena (Teste_{DA}). Os provetes de ambos os ensaios pertencem à mesma amassadura, diferindo no facto de o provete para medição da deformação autógena ser submerso em água a temperatura constante ($T=20^{\circ}\text{C}$) e não incluir um tubo em espiral embebido no seu interior.

O registo das temperaturas no interior dos provetes e na água dos reservatórios é realizado por 4 sensores de resistência (platina) PT100 através de um *DataTaker™ DT80G*, com uma taxa de aquisição até 1Hz e resolução de 18 bits. Os LVDTs usados para a medição das deformações (modelo GT0500Z da RDP Group) têm um curso de 14mm e uma gama de medição de $\pm 0.5\text{mm}$, com 110mV/V de sensibilidade. O registo das medições com os LVDTs é realizado com o sistema de aquisição da National

Instruments NI SCXI-1001. De forma a evitar o efeito da variação de temperatura nos LVDTs, ambos os ensaios decorrem no interior de uma camara climática com temperatura constante de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

2.3 - Determinação do CDT

O valor do CDT é calculado com base nos resultados dos ensaios Teste_{CDT} e Teste_{DA}. A extensão total do betão no provete do Teste_{CDT} pode ser descrita como:

$$\varepsilon_{tot}^{CDT} = \varepsilon_t^{CDT} + \varepsilon_{au}^{CDT} \quad [1]$$

em que ε_{tot}^{CDT} é a extensão total (valor que é corrigido tendo em conta a deformação dos varões invar, cujo CDT é conhecido - $\alpha_{INVAR} = 1.5 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$), ε_t^{CDT} é a extensão térmica e ε_{au}^{CDT} é a extensão por retração autógena. ε_{tot}^{CDT} pode ser determinada com base na deformação medida pelo LVDT (ΔL^{CTE}) no Teste_{CDT}:

$$\varepsilon_{tot}^{CDT} = \frac{\Delta L^{CTE}}{L^{CTE}} \quad [2]$$

em que L^{CTE} é o comprimento original do provete no Teste_{CDT} (300mm).

Uma vez que a variação de temperatura no Teste_{DA} é marginal, a extensão térmica do provete nesse ensaio pode ser desprezada ($\varepsilon_t^{DA} \cong 0$). Assim, a extensão total do betão no provete do Teste_{DA} (ε_{tot}^{DA}) é igual à extensão por retração autógena no Teste_{DA} (ε_{au}^{DA}) e pode ser descrita como:

$$\varepsilon_{tot}^{DA} = \varepsilon_{au}^{DA} = \frac{\Delta L^{DA}}{L^{DA}} \quad [3]$$

em que ΔL^{DA} é a deformação medida pelo LVDT no Teste_{DA} e L^{DA} é o comprimento original do provete no Teste_{DA} (300mm).

Tendo em conta que $\varepsilon_{au}^{DA} = \varepsilon_{au}^{CDT}$, a extensão térmica do Teste_{CDT} pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$\varepsilon_t^{CDT} = \varepsilon_{tot}^{CDT} - \varepsilon_{au}^{DA} \quad [4]$$

Efetua-se o cálculo de um único valor do CDT para cada par de fases consecutivas. Para uma dada fase 'i' (de aquecimento ou arrefecimento), calculam-se dois valores relevantes, correspondentes à média dos valores medidos nos últimos 5 minutos de cada fase (neste período a temperatura no interior do provete é estável e pode considerar-se constante ao longo da secção transversal): extensão térmica $\varepsilon_{t,i}^{CDT}$ e o respetivo valor de temperatura no interior do provete $T_{p,i}^{CDT}$.

Seguindo o mesmo princípio, calcula-se dois valores relativos à fase seguinte ($\varepsilon_{t,i+1}^{CDT}$ e $T_{p,i+1}^{CDT}$). Considerando que $\Delta \varepsilon_t^{CDT} = \alpha \times \Delta T_p^{CDT}$, o coeficiente de dilatação térmica α entre as fases 'i' e 'i+1' pode ser determinado como segue:

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon_t^{CDT}}{\Delta T_p^{CDT}} = \frac{\varepsilon_{t,i+1}^{CDT} - \varepsilon_{t,i}^{CDT}}{T_{p,i+1}^{CDT} - T_{p,i}^{CDT}} \quad [5]$$

3 - CAMPANHA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO CDT

3.1 - Materiais e ensaios realizados

No sentido de aferir a fiabilidade do método proposto para determinação do CDT desde as primeiras idades, foram definidas 3 composições de betão, designadas por BetAC74, BetAC53 e BetAC38. A primeira foi usada em duas betonagens distintas (designadas por BetAC74a e BetAC74b), de forma a aferir a repetibilidade do método proposto. As três composições estão detalhadas nos Quadros 1 a 3. Para todas as composições foram realizados ensaios de compressão em cubos, aos 28 dias de idade, e a metodologia EMM-ARM (Azenha et al., 2010, Granja, 2016, Granja e Azenha, 2016) foi utilizada para determinação do módulo de elasticidade do betão desde as primeiras idades. O tempo de ganho de presa, desde o instante de contacto da água com o cimento, foi determinado através de um procedimento proposto e validado por Granja (2016), que consiste em determinar a primeira derivada da evolução do módulo de elasticidade medido nos ensaios EMM-ARM (dE/dt), sendo que o tempo de ganho de presa corresponde ao instante em que a curva dE/dt atinge 50% do seu valor máximo.

A relação w/c das composições BetAC74, BetAC53 e BetAC38 é de 0.74, 0.53 e 0.38, e a resistência à compressão aos 28 dias é de 28.6MPa, 48.1MPa e 70MPa, respetivamente.

O betão da composição BetAC53 foi produzido de acordo com o protocolo adotado num Round Robin Test (COST-TU1404, 2016). O betão da composição BetAC38 é auto-compactável (BAC) e foi

dimensionado de acordo com a metodologia proposta por Soltanzadeh et al. (2016a), Soltanzadeh et al. (2016b) e Soltanzadeh e Barros (2015).

Quadro 1 – Composição do betão BetAC38.

Material	Quantidade (kg/m ³)	Descrição
Cimento	553.8	Tipo CEM I 42.5R
Areia Fina	235	d _{max} =2.36mm
Areia do rio	621.1	d _{max} =4.75mm
Agregado1	227.1	d _{max} =9mm
Agregado 2	530	d _{max} =12mm
Superplastificante	14.5	Glenium BASF: SKY 617
Cinzas volantes	115	Classe F
Água	211.3	-

Quadro 2 – Composição do betão BetAC53.

Material	Quantidade (kg/m ³)	Descrição
Cimento	320	Tipo CEM I 52.5 N CE CP2 NF
Areia	830	d _{max} =4mm
Agregado 1	449	d _{max} =11mm
Agregado 2	564	d _{max} =16mm
Plastificante	1.4	SIKAPLAST Techno 80
Água	172.4	-

Quadro 3 – Composição do betão BetAC74.

Material	Quantidade (kg/m ³)	Descrição
Cimento	290	Tipo CEM II A L42.5R
Areia fina	544	d _{max} =2.36mm
Areia do rio	425	d _{max} =4.75mm
Agregado 1	162	d _{max} =7.1mm
Agregado 2	766	d _{max} =9mm
Plastificante	2.3	Chrysoplast 820
Água	216.6	-

3.2 - Resultados

A Figura 4 apresenta a evolução das extensões totais em ambos os provetes (ε_{tot}^{CDT} e ε_{tot}^{DA}) do ensaio do betão BetAC74a. Observa-se que, tal como seria espectável, a curva $\varepsilon_{tot}^{DA} - t$ segue a evolução média da curva $\varepsilon_{tot}^{CDT} - t$. Uma análise mais pormenorizada à curva $\varepsilon_{tot}^{CDT} - t$ permite observar que no final de cada fase (aquecimento ou arrefecimento) ocorre um pico de extensão. Este fenómeno pode ser justificado pelas mudanças rápidas de temperatura que ocorrem entre as fases de aquecimento e arrefecimento, provocando um desequilíbrio térmico entre o equipamento de teste e o provete. Uma vez que o LVDT é suportado pelos varões da estrutura que envolve o provete, uma rápida deformação dos primeiros em relação ao segundo é sentida na leitura do LVDT.

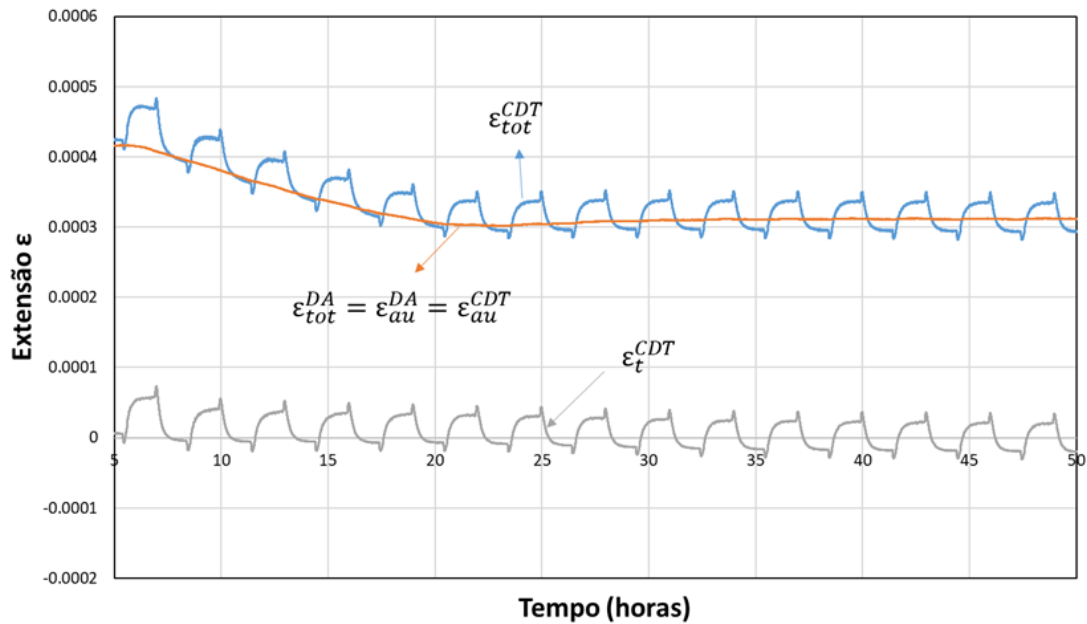


Figura 4 – Evolução da extensão desenvolvida no provete com a composição BetAC74b.

A evolução do CDT nos 4 ensaios realizados, determinada de acordo com o método proposto na Secção 2.3, está representada na Figura 5. É possível observar que o CDT nas primeiras idades dos 4 betões testados varia significativamente com o tempo. As curvas $\alpha - t$ obtidas para os testes BetAC74a e BetAC74b estão, de forma geral, em acordo. Contudo, para o período anterior ao ganho de presa do betão ($t=8.52h$), as curvas $\alpha - t$ destes betões apresentam comportamentos distintos. Pode-se argumentar que antes do ganho de presa há perturbações causadas pelo assentamento e sedimentação do betão, pelo que medições do CDT até esse instante podem não estar totalmente relacionadas com a livre deformação do betão.

Observa-se também que imediatamente após o início do ensaio o valor do CDT medido é bastante elevado. Este fenómeno é justificado pela influência dominante da quantidade de água presente no provete. Quando não existe um esqueleto sólido, o CDT é muito influenciado pelo elevado CDT da água, que é bastante superior ao dos restantes componentes do betão. À medida que a água é consumida no processo de hidratação do cimento o CDT diminui até atingir valores mínimos entre as 12h-20h.

Após ser atingido o valor mínimo do CDT, foram observados dois comportamentos distintos, dependendo da relação w/c dos provetes. Para o betão BetAC38, com um w/c baixo, o valor do CDT aumentou após as 20h (correspondente ao valor mínimo de CDT). Uma justificação plausível prende-se com a progressiva secagem interna causada pela autodessecação do betão (Bjontegaard e Sellevold, 2003, Gasley e Lange, 2007). O CDT deste betão às 85h é de $14.2\mu m/m/^{\circ}C$ (20% superior ao valor mínimo obtido - $11.8\mu m/m/^{\circ}C$). A tendência para o CDT aumentar também foi observada no betão BetAC53, com $w/c=0.53$, contudo a diferença entre o CDT obtido às 85h ($7.7\mu m/m/^{\circ}C$) e o valor mínimo obtido ($7.0\mu m/m/^{\circ}C$) é pequena. Nos betões com elevada relação w/c (BetAC78a e BetAC78b) o CDT é praticamente constante após atingir o valor mínimo, uma vez que a quantidade de água presente nos poros da matriz cimentícia permanece elevada durante o processo de hidratação do cimento.

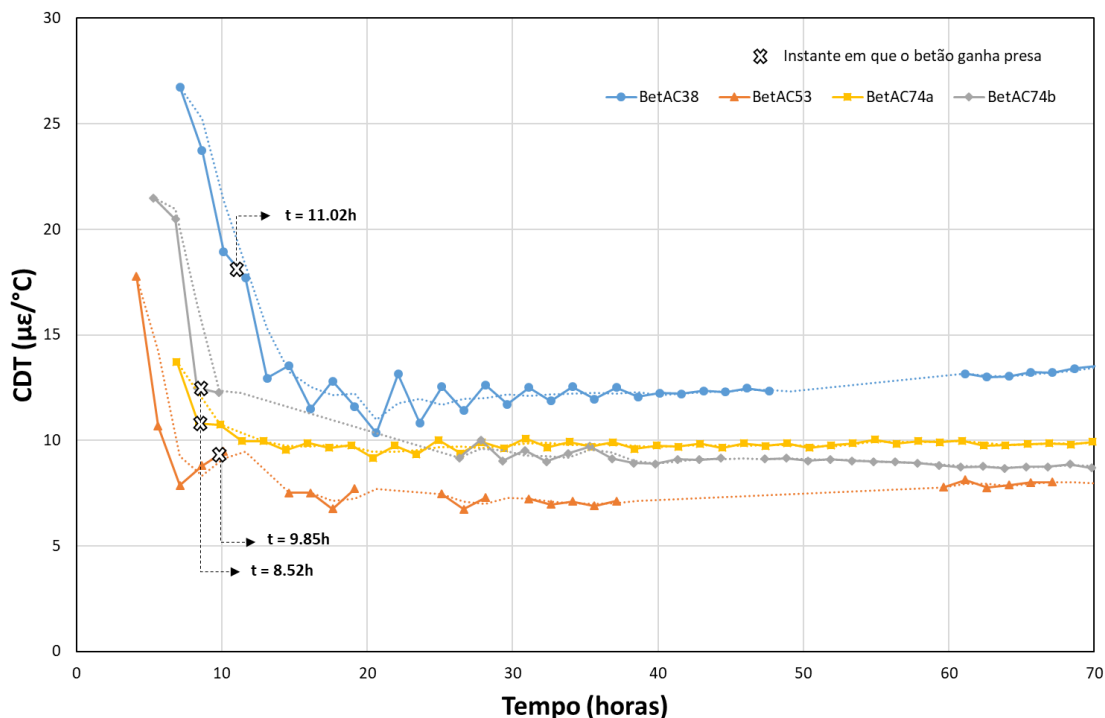


Figura 5 – Evolução do valor do CDT ao longo do tempo.

Na curva $\alpha - t$ para o provete BetAC38 observa-se ainda uma oscilação relevante durante o período entre as 13h e as 40h. O ritmo elevado do processo de hidratação poderá estar na origem deste fenómeno. Uma vez que este betão tem uma quantidade elevada de cimento (553.8Kg/m^3) e, conseqüentemente, uma maior libertação de calor durante o processo de hidratação, a estabilização da temperatura no interior do provete é afetada, resultando numa maior oscilação dos valores de CDT medidos. A Figura 6 apresenta a evolução da temperatura do provete de betão BetAC38 para medição da retração autógena, confirmando-se que o intervalo de maior oscilação dos valores do CDT coincide com o período de tempo em que a temperatura interna do provete foi mais elevada. Deve-se ressaltar que o aumento de temperatura interna neste provete se deve unicamente às reações da hidratação do cimento, uma vez que o mesmo foi sujeito a uma temperatura constante durante todo o ensaio ($T=20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$).

As curvas $\alpha - t$ para os restantes provetes (BetAC53, BetAC78a e BetAC78b) também apresentam alguma oscilação no período entre as 13h e as 40h. No entanto, essas oscilações não são tão significativas em comparação com as do provete BetAC38, uma vez que a quantidade de cimento é bastante menor e, conseqüentemente, o calor libertado durante o processo de hidratação do cimento não tem tanta influência na estabilização da temperatura interna dos provetes.

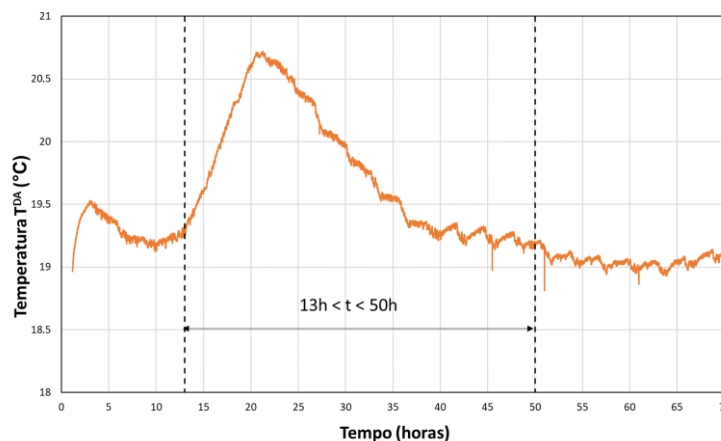


Figura 6 – Evolução da temperatura no provete com betão BetAC38 no Teste_{DA}.

4 - CONCLUSÕES

Neste trabalho é proposto um novo método de ensaio para determinar o coeficiente de dilatação térmica (CDT) do betão desde as primeiras idades. Algumas das limitações inerentes às abordagens existentes na literatura para a determinação do CDT no betão (tamanho do provete, duração da variação térmica e necessidade de desmoldagem do provete) são eliminadas no método proposto. Para tal, foi desenvolvido um equipamento de ensaio que permite determinar, de forma isolada, as deformações térmica e autógena do betão, através da realização de dois ensaios em simultâneo. O molde flexível do provete, em forma de fole, deforma-se juntamente com o betão, permitindo a medição do CDT imediatamente após a betonagem. Os provetes ensaiados têm dimensões correspondentes às exigências normativas para ensaios em betão convencional. Tendo em conta a inércia térmica de provetes desta dimensão, foi adotado um sistema de aquecimento/arrefecimento em que o provete é colocado dentro de um reservatório com água a temperatura regulável, que circula no interior do provete através de um tubo em espiral embebido no seu interior, acelerando desta forma o processo de homogeneização da temperatura.

A capacidade do método proposto para determinar o CDT do betão nas primeiras idades foi testada através da realização de vários ensaios piloto. Nestes ensaios observou-se que o CDT nas primeiras idades, para todas as composições testadas, variou significativamente ao longo do tempo. Em todos os ensaios foram determinados valores iniciais de CDT elevados, devido à influência dominante da água livre no período de tempo anterior ao ganho de presa do betão. À medida que a água é consumida no processo de hidratação, o valor do CDT diminui até um mínimo. Após atingir este valor mínimo foram observados dois comportamentos: nos betões com elevado rácio w/c o valor do CDT manteve-se relativamente constante, enquanto que nos betões com menor rácio w/c se observou um aumento gradual do CDT, possivelmente motivado pela secagem interna devida à autodessecação do betão. Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que o método de ensaio apresentado é apto para determinar o CDT nas primeiras idades em betões correntes sob condições isotérmicas e com potencial para, em ensaios futuros, determinar este parâmetro em condições mais realistas através da sujeição dos provetes a ciclos de temperatura em torno das temperaturas observáveis ao longo dum processo de cura real.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é suportado pelos projetos POCI-01-0145-FEDER-007457 (CONSTRUCT - Institute of R&D in Structures and Construction) e POCI-01-0145-FEDER-007633 (ISISE), financiados por fundos FEDER através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia. Agradece-se ainda à FCT e FEDER (COMPETE2020) o financiamento do projeto IntegraCrete PTDC/ECM-EST/1056/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016841).

REFERÊNCIAS

- AASHTO-T336 (2011). Standard method of test for coefficient of thermal expansion of hydraulic cement concrete.
- ASTMC531 (2012). Standard test method for linear shrinkage and coefficient of thermal expansion of chemical-resistant mortars, grouts, monolithic surfacings, and polymer concretes. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Azenha, M., Magalhães, F., Faria, R. e Cunha, A. (2010). *Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration*. Cement and Concrete Research, 40, 1096-1105.
- Azenha, M., Silva, A. e Granja, J. (2014). *Metodologia para medição contínua do coeficiente de dilatação térmica do betão desde as primeiras idades*. JPEE 2014 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa.
- Bjontegaard, O., Hammer, T. A. e Sellevold, E. J. (2004). *On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete*. Cement and Concrete Composites, 26, 427-435.
- Bjontegaard, O. e Sellevold, E. (2003). *Thermal dilation and autogenous deformation*. International RILEM Conference on Early Age Cracking in Cementitious Systems.

- Bjontegaard, O. e Sellevold, E. J. (2001). *Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete*. *Materials and Structures*, 34, 266–272.
- Boulay, C. (2012). *Test rig for early age measurements of the autogenous shrinkage of a concrete*. RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues concerning Early-Age of Concrete Structures.
- COST-TU1404 2016. Main phase of the extended Round Robin Testing programme for TU1404.
- Crawford, G. L., Gudimettla, J. M. e Tanesi, J. (2010). *Interlaboratory study on measuring coefficient of thermal expansion of concrete*. *Journal of the Transportation Research Board*, 2164, 58–65.
- Cusson, D. e Hoogeveen, T. J. (2006). *Measuring early-age coefficient of thermal expansion in high-performance concrete*. International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. Lyngby, Denmark.
- Delsaute, B. (2016). *New approach for Monitoring and Modelling of the Creep and Shrinkage behaviour of Cement Pastes, Mortars and Concretes since Setting Time*. Université Libre de Bruxelles.
- Delsaute, B., Torrenti, J. M. e Staquet, S. (2016). *Monitoring and modeling of the early age properties of the Vercors Concrete*. TINCE 2016. Paris.
- Granja, J. (2016). *Continuous characterization of stiffness of cement-based materials: Experimental analysis and micro-mechanics modeling*. PhD, Universidade do Minho.
- Granja, J. e Azenha, M. (2016). *Towards a robust and versatile method for monitoring E-modulus of concrete since casting: Enhancements and extensions of EMM-ARM*. Strain.
- Grasley, Z. C. e Lange, D. A. (2007). *Thermal dilation and internal relative humidity of hardened cement paste*. *Materials and Structures*, 40, 311–317.
- Heum, J., Choi, S. e Won, M. C. (2013). *In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development*. *Construction and building materials*, 38, 306–315.
- ISO1920-10 (2010). *Testing of concrete – Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression*. International Organization for Standardization.
- Ji, T., Zhang, B., Zhuang, Y. e Wu, H. (2015). *Effect of Lightweight Aggregate on Early-Age Autogenous Shrinkage of Concrete*. *ACI Material Journal*, 112, 355–364.
- Kada, H., Lachemi, M., Petrov, N., Bonneau, O. e Aitcin, P. C. (2002). *Determination of the coefficient of thermal expansion of high performance concrete from initial setting*. *Materials and Structures*, 35, 35–41.
- Loser, R., Münch, B. e Lura, P. (2010). *A volumetric technique for measuring the coefficient of thermal expansion of hardening cement paste and mortar*. *Cement and Concrete Research*, 40, 1138–1147.
- Loukili, A., Chopin, D., Khelidj, A. e Le Touzo, J. (2000). *New approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history*. *Cement and Concrete Research*, 30, 915–922.
- Maruyama, I. e Teramoto, A. (2011). *Impact of time-dependant thermal expansion coefficient on the early-age volume changes in cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, 41, 380–391.
- Myers, L., Gudimettla, J. M., Crawford, G. L., Guercio, M. C. e Allen, D. (2015). *Impacts of variability in coefficient of thermal expansion on predicted concrete pavement performance*. *Construction and building materials*, 93, 711–719.
- Naik, T. R., Kraus, R. N. e Kumar, R. (2011). *Influence of types of coarse aggregates on the coefficient of thermal expansion of concrete*. *Journal of Materials in civil Engineering*, 23, 467–472.
- SCIENTIFIC, G. (2012). *Operating Manual*. Labwise™ control and analysis software for the laboratory.
- Sellevold, E. J. e Bjontegaard, O. (2006). *Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: mechanism of moisture interaction*. *Materials and Structures*, 39, 809–815.

- Siang, G. C. (2017). *Determination of Coefficient of Thermal Expansion (CTE) of 20MPa Mass Concrete Using Granite Aggregate*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 217.
- Siddiqui, S. e Fowler, D. W. (2015). *A systematic optimization technique for the coefficient of thermal expansion of Portland cement concrete*. Construction and building materials, 88, 204–211.
- Soltanzadeh, F. e Barros, J. A. O. (2015). *High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: Experimental and numerical research*. Construction and building materials, 77, 94-109.
- Soltanzadeh, F., Edalat-Behbahani, A., Barros, J. A. O. e Mazaheripour, H. (2016a). *Effect of fiber dosage and prestress level on shear behavior of hybrid GFRP-steel reinforced concrete I-shape beams without stirrups*. Composites Part B: Engineering, 102, 57-77.
- Soltanzadeh, F., Edalat-Behbahani, A., Mazaheripour, H. e Barros, J. A. O. (2016b). *Shear resistance of SFRSCC short-span beams without transversal reinforcements*. Composite Structures, 139, 42-61.
- Wyrzykowski, M. e Lura, P. (2013). *Moisture dependence of thermal expansion in cement-based materials at early ages*. Cement and Concrete Research, 53, 25-35.
- Zhang, W., Min, H., Gu, X., Xi, Y. e Xing, Y. (2015). *Mesoscale model for thermal conductivity of concrete*. Construction and building materials, 98, 8-16.
- Zhutovsky, S. e Kovler, K. (2017). *Application of ultrasonic pulse velocity for assessment of thermal expansion coefficient of concrete at early age*. Materials and Structures, 50, 1–8.