

## SÍNTESE DE EVIDÊNCIA CIENTÍFICA EM ESTUDOS DA FORMAÇÃO DA ETRINGITA TARDIA (DEF)

Dioice Schovanz<sup>1</sup>; Francieli Tiecher<sup>2</sup>; Nicole Pagan Hasparyk<sup>3</sup>

1 Mestranda em Engenharia Civil, Faculdade Meridional – IMED, campus Passo Fundo/RS, dioice.s@hotmail.com.

2 Doutora em Engenharia Civil, Professora da Escola Politécnica e coordenadora do PPGECC – IMED, francieli.bonsembiante@imed.edu.br.

3 Doutora em Engenharia Civil, ELETROBRAS Furnas, nicolepha@furnas.com.br

### 1 INTRODUÇÃO

A formação da etringita tardia – DEF (*Delayed Ettringite Formation*) no concreto é conhecida por se desenvolver em estruturas maciças, como pontes, usinas nucleares, barragens e blocos de fundação de edificações, ou seja, estruturas de grande porte, quando houver contato direto com umidade excessiva. Um dos principais indícios dessa manifestação patológica é a fissuração, que é oriunda da expansão do concreto devido à formação da etringita tardiamente, afetando significativamente as propriedades mecânicas das estruturas de concreto (MULTON; SELLIER, 2019).

A temperatura, além da umidade, é um dos fatores mais importantes para a ocorrência de DEF. O LCPC – *Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées* (2009) ressalta que temperaturas elevadas podem ser atingidas em função do próprio calor de hidratação do cimento durante as concretagens, bem como devido ao tipo de cura utilizado. Por isso é importante ter controle da taxa de elevação da temperatura do concreto. Em geral, a taxa máxima recomendada para evitar o surgimento de fissuras térmicas é de 20°C/h (NEVILLE, 2016).

Em concretos “saudáveis”, a etringita primária é um produto normal das reações de hidratação, formada a partir da reação do C<sub>3</sub>A e do C<sub>4</sub>AF com o gesso durante a etapa plástica da hidratação do cimento, na presença de água. Mas, quando as temperaturas, no momento da cura, são superiores a 65°C, a etringita não se forma. Após a cura e resfriamento do concreto, esse já no estado endurecido, os íons sulfato disponíveis na solução dos poros do concreto passam a reagir quimicamente com os demais compostos da pasta hidratada para a formação, de modo lento, da

etringita tardia, denominada DEF (TAYLOR, 1997; ODLER 1998; COLLEPARDI, 2003).

O processo expansivo que ocorre no concreto pelo desencadeamento da DEF, leva a estrutura a sofrer efeitos locais macroscópicos semelhantes aos criados pela reação álcali-agregado (RAA). Essa relação é, principalmente, constituída pelo inchaço do material e a quebra microestrutural, que reduz as propriedades mecânicas, causando grandes deteriorações estruturais devido às deformações e tensões adicionais inesperadas no concreto (MELO, 2011; GODART, 2017).

Sendo assim, a partir da contextualização apresentada, esta pesquisa objetiva comparar estudos científicos sobre a DEF, considerando aqueles que seguiram metodologias semelhantes para verificação desta patologia.

## **2 METODOLOGIA**

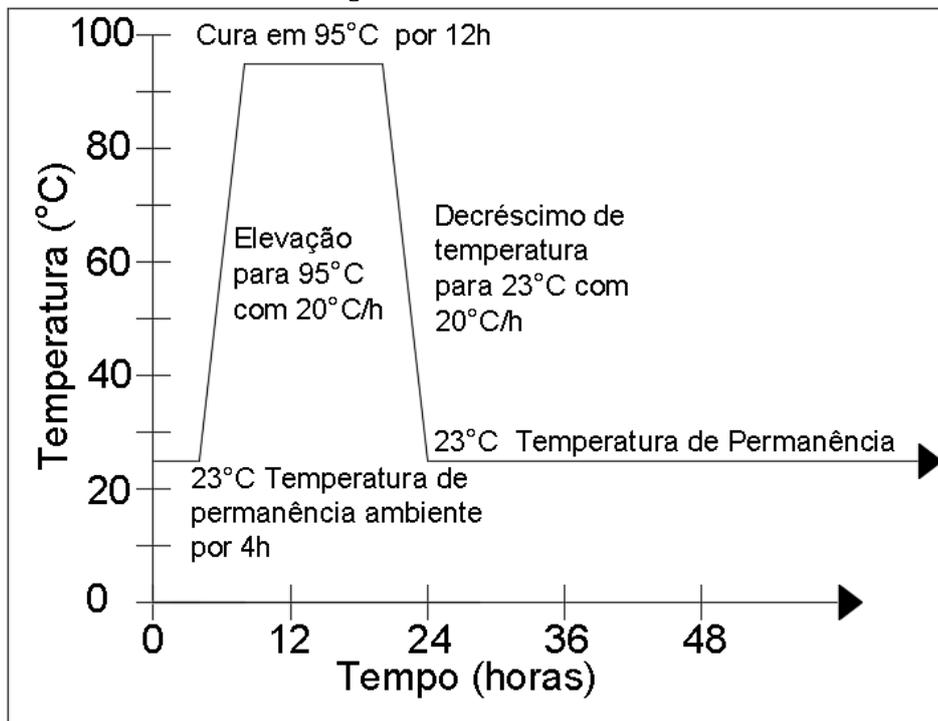
A presente pesquisa consiste na avaliação da existência de similaridades ou disparidades entre resultados de estudos que contemplam DEF.

Os estudos em laboratório da ocorrência de DEF visam à prevenção da ocorrência dessa patologia, entretanto, seguem metodologias díspares para tal avaliação. Mediante a esta problemática, busca-se identificar as similaridades e disparidades nos resultados de expansão da DEF em estudos com concreto e argamassa.

Uma metodologia extensivamente utilizada foi a desenvolvida por Duggan, que, em princípio, destinava-se ao estudo da RAA com várias combinações de cimentos e agregados (BAUER et. al., 2006). Contudo, ao longo dos experimentos verificou-se que a DEF era a principal causa dos danos observados. Dessa forma, o teste desenvolvido por Duggan foi abandonado, porém serviu como parâmetro para novas metodologias de análise. Atualmente, o método mais utilizado para a verificação de ocorrência da DEF é o de FU (1996).

Para a realização do presente estudo utilizou-se como parâmetro o método de Rashidi *et al.*, (2017), em função da metodologia empregada para os procedimentos de aquecimento e resfriamento. A Figura 1 apresenta esquematicamente a metodologia adotada por Rashidi *et al.*, (2017).

Figura 1 – Método de cura



Fonte: RASHIDI *et al.*, (2017).

Para o desenvolvimento do trabalho foram escolhidos seis estudos, três que estudaram a DEF em concreto e três que estudaram a DEF em argamassa. Os mesmos foram selecionados com base no método de cura que utilizaram. Os estudos contemplados nesta pesquisa que avaliaram DEF em argamassa foram: Nguyen *et al.*, (2013); Leklou *et al.*, (2016); Rashidi *et al.*, (2017). A avaliação em concreto foi realizada nos seguintes trabalhos: Amine *et al.*, (2017); Martin *et al.*, (2017); Giannini *et al.*, (2018).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise da expansão por DEF em estudos com argamassa

As características e as diferenças entre os estudos em argamassa para avaliação das expansões decorrentes do desenvolvimento de DEF estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estudos de DEF em argamassa

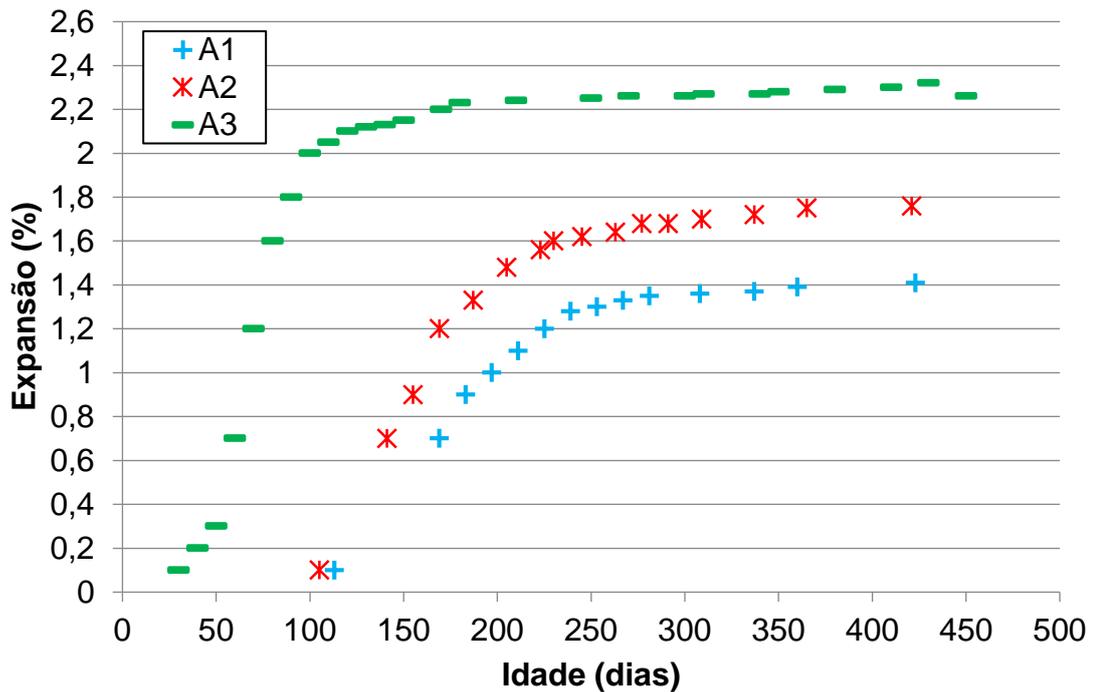
Referência	Nomenclatura	Tipo e dimensão da amostra	Método de Aquecimento e Resfriamento	Condição do Ambiente de Exposição	Tempo de ensaio
Nguyen <i>et al.</i> , (2013)	A1	Argamassa em formato de prisma (40x40x160mm)	- Pré-cura a 20°C por 2h; - Taxa de Aquecimento 30°C/h; - Permanência 80°C/10h; - Taxa de resfriamento 5°C/h até 20°C.	- Aquecido e resfriado em camara úmida; - Armazenado com imersão em água;	500 dias
Leklou <i>et al.</i> , (2016)	A2	Argamassa em formato de prisma (40x40x160mm)	- Pré-cura a 20°C por 2h; - Taxa de aquecimento 30°C/h; - Permanência 80°C/10h; - Taxa de resfriamento 5°C/h;	- Aquecido e resfriado em camara úmida; - Armazenado em água desionizada a 20°C;	650 dias
Rashidi <i>et al.</i> , (2017)	A3	Argamassa em formato de prisma (25x25x285mm)	- Pré-cura a 23°C por 4h; - Taxa de Aquecimento 20°C/h; - Permanência 95°C/12h - Taxa de resfriamento 20°C/h até 23°C.	- Pré-cura em ambiente normal; - Aquecimento e resfriado com imersão em água; - Armazenagem em água com cal.	450 dias

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA (2019).

Observando-se a Tabela 1 nota-se que os estudos avaliados nesta pesquisa possuem diversas diferenças importantes, tais como a dimensão dos corpos de prova, as condições do ambiente de exposição e o tempo de ensaio. A metodologia empregada para o aquecimento/resfriamento também não é idêntica entre os trabalhos, porém, a principal diferença nesse quesito são as temperaturas de pré-cura e de cura em alta temperatura, bem como as taxas de aquecimento e resfriamento.

Sendo assim, na presente pesquisa a análise das expansões por DEF dos trabalhos desenvolvidos em argamassa, identificados como A1, A2 e A3, conforme retratado na Tabela 1, levou-se em consideração para a análise dos resultados apenas a metodologia de avaliação (nesta pesquisa não foram consideradas as características dos materiais empregados pelos autores). Ainda, como parâmetro de comparação, a idade final aproximada para as verificações foi de 430 dias. A Figura 2 mostra as expansões ao longo do tempo, em barras de argamassa, para os estudos avaliados nesta pesquisa.

Figura 2 – Gráfico de expansões das argamassas ao longo do tempo.



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA (2019).

Observando-se a Figura 2, nota-se que as menores variações de resultados ocorreram entre os estudos A1 e A2. Ambos os estudos adotaram o mesmo método de aquecimento e resfriamento, ou seja, após um período de cura inicial (2h em temperatura de 20°C), mantiveram a mesma temperatura de cura, que foi de 80°C, por 10 h.

No estudo A3 a cura inicial foi em ambiente de laboratório. Após esse período, os corpos de prova foram mantidos a 95°C por 12 h. Essa metodologia resultou em expansões aproximadamente 76% superiores para a idade final de avaliação (430 dias).

A partir dessa análise, evidencia-se que a temperatura de permanência é um dos principais influenciadores físicos para o processo de expansão na argamassa devido a DEF. O aumento de 15°C no processo de cura pode causar um percentual evidente nas expansões, já identificável nos primeiros dias. Em campo isso significa que, quanto maior for a temperatura do concreto nas primeiras horas após a concretagem, mais evidentes e precoces serão os danos decorrentes da DEF, devido a inibição da formação da etringita primária, propiciando a ocorrência da etringita secundária (DEF).

Outro aspecto que pode ser levado em consideração, a partir dos estudos em argamassa, são as expansões iguais ou maiores que 0,20%. Esse percentual de expansão é considerado indicativo de manifestações deletérias decorrentes da RAA aos 28 dias (ASTM C 1260: 2007; NBR 15577-1: 2018). Nos estudos de DEF A2 apresentou expansões dessa ordem em torno de 40 dias, enquanto A1 e A3 após os 100 dias.

### 3.1 Análise da expansão por DEF em estudos com concreto

A Tabela 2 apresenta as características e diferenças dos estudos realizados em concreto que foram contemplados nesta pesquisa.

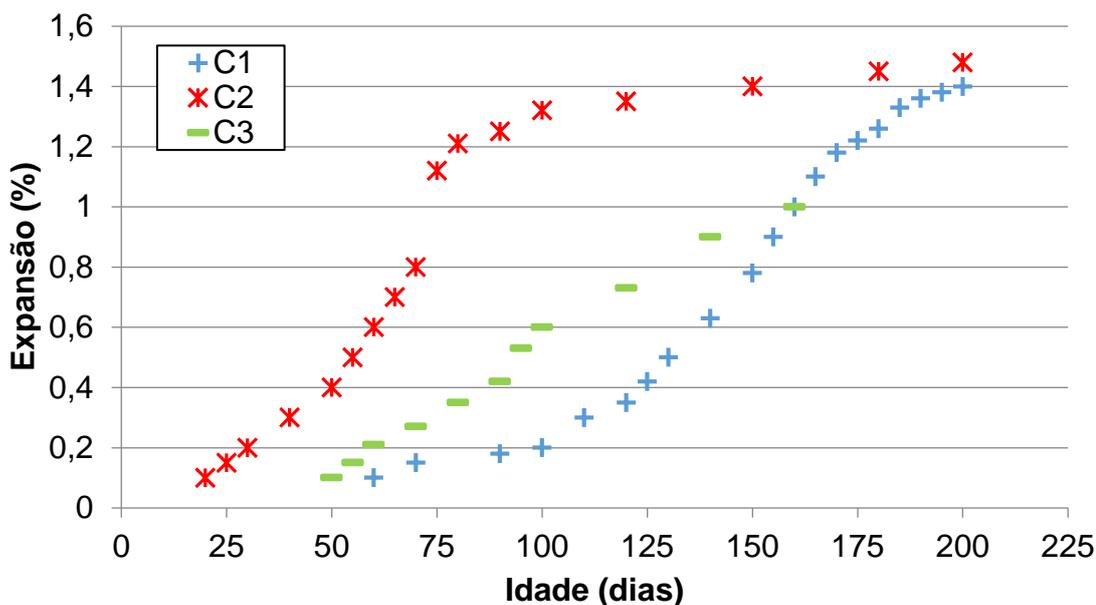
Tabela 2 – Estudos de DEF em concreto

Referência	Nomenclatura	Tipo e dimensão da amostra	Método de Aquecimento e Resfriamento	Condição do Ambiente de Exposição	Tempo de ensaio
Amine <i>et al.</i> , (2017)	C1	Concreto em formato de viga (250x50x300mm)	- Início de aquecimento a 20°C; - Taxa de aquecimento 2,5°C/h; - Permanência em 80°C/72h; - Taxa de resfriamento 1°C/h.	- Aquecido, resfriado e armazenado com a parte inferior imersa em água e a parte superior à umidade relativa de 30%; - Permaneceu em temperatura de 20 °C.	700 dias
Martin <i>et al.</i> , (2017)	C2	Concreto em formato de viga (250x50x300mm)	- Início de aquecimento a 20°C; - Taxa de aquecimento 2,5°C/h; - Permanência em 80°C/72h; - Taxa de resfriamento 1°C/h.	- Aquecido, resfriado e armazenado com a parte inferior imersa em água e a parte superior à umidade relativa de 30%; - Permaneceu em temperatura de 38 °C.	400 dias
Giannini <i>et al.</i> , (2018)	C3	Concreto em formato de cilindro (100x200mm)	- Início de aquecimento a 23°C; - Taxa de aquecimento 17°C/h; - Permanência em 90°C/12h; - Taxa de resfriamento 17°C/h.	- Aquecido e resfriado em forno; - Armazenado em água com cal saturada a 23°C.	160 dias

Fonte: PRÓPRIA AUTORIA (2019).

Observando-se a Tabela 2 nota-se que, assim como foi percebido nos trabalhos em argamassa, há diferenças nas dimensões dos corpos de prova avaliados, bem como nas condições de exposição e tempo de ensaio. Em relação ao método de aquecimento/resfriamento a diferença está principalmente na temperatura de permanência. Sendo assim, considerando-se a idade de 200 dias de ensaio, foi plotado o gráfico da Figura 3.

Figura 3 – Gráfico de expansões dos concretos ao longo do tempo.



Fonte: PRÓPRIA AUTORIA (2019).

A Figura 3 mostra que os concretos C1 e C2, expostos às mesmas condições de aquecimento e resfriamento, porém com temperaturas de permanência diferentes (C1 permaneceu em 20°C e C2 permaneceu em 38°C) resultaram em comportamento próximo aos 200 dias, antes disso, C2 apresentou expansões mais pronunciadas devido a sua permanência em temperatura mais elevada. O concreto C3 apresentou expansões intermediárias desde o início do ensaio, tornando-se idêntico ao C1, aos 160 dias.

Levando-se em conta os estudos em concreto para avaliação da RAA, tem-se que expansões superiores a 0,10% são consideradas deletérias aos 365 dias (NBR 15577-1:2018). Esse percentual foi atingido antes dos 25 dias no estudo C2 e dos 50 dias para os demais, ou seja, expansões dessa ordem já podem ser consideradas deletérias.

Os concretos do estudo C3, apesar de terem passado por um processo de cura com uma temperatura 10°C mais elevada, não desenvolveram expansões mais elevadas em relação ao C2. Cabe salientar, mais uma vez, que, aos 160 dias, C1 e C3 apresentaram o mesmo percentual de expansão, em torno de 1%, enquanto C2 apresentou-se com expansão em torno de 1,4%.

Sendo assim, a partir dos estudos em concreto avaliados nesta pesquisa, destaca-se a influência da temperatura inicial de cura. Quanto maiores as temperaturas do concreto nas primeiras horas após a concretagem, mais intensa e rápida é a

ocorrência de DEF. Entretanto, de acordo com a pesquisa feita, ao longo do tempo a quantidade de DEF formada tende a ficar equivalente independente da temperatura de cura e permanência, o que foi evidenciado pelas expansões similares entre os estudos aos 200 dias.

#### **4 CONCLUSÕES**

Com a realização dessa pesquisa ficou evidente a importância e necessidade dos cuidados com a temperatura no momento da realização de uma concretagem, principalmente quando se trata de concreto massa (grande quantidade de concreto em um único elemento). Cabe aqui salientar que, além dos parâmetros estudados, também se sabe que há influência dos tipos de cimentos e dos elevados consumos de cimento na ocorrência de DEF.

O estudo A3 apresentado, que teve uma taxa de aquecimento consideravelmente superior aos demais, correspondeu a uma expansão de 2,3% aos 450 dias, consideravelmente elevada, corroborando com a afirmação da problemática temperatura nos canteiros de obras.

Nos estudos em concreto foram percebidas diferenças importantes entre as expansões até em torno de 200 dias, quando as mesmas se tornaram equivalentes, independente da temperatura de cura e permanência.

Comparando-se os resultados obtidos em laboratório para estudos em concreto e em argamassa, nota-se que a ocorrência de DEF sofre influência do tipo de amostra avaliada. As expansões em argamassa foram 64% superiores, considerando-se a idade de 200 dias, para a pior condição em ambas as amostras (A2 e C2).

De qualquer modo, o estudo pode concluir que existiu similaridade de comportamento entre os resultados dos estudos, correspondendo à expectativa de que o método utilizado para a verificação da manifestação patológica DEF é condizente e eficiente.

#### **Agradecimentos**

A Faculdade Meridional (IMED) campus de Passo Fundo/RS, pelo apoio prestado para a realização desta pesquisa.

A Furnas Centrais Elétricas S.A., pela oportunidade de estarmos fazendo parte de um Projeto de P&D ANEEL Furnas.

Agradecimento em especial a Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS. Bolsista da FAPERGS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAIS. **ASTM C - 1260/07**: Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15577-1**: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

AMINE, Y.; LEKLOU, N.; AMIRI, Q.. Effect of supplementary cementitious materials (SCM) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes. **Energy Procedia**, v. 139, p. 565-570, 2017.

BAUER, S. *et al.* *Alkali-silica reaction and delayed ettringite formation in concrete: A literature review. Report*: Project performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. *Center for Transportation Research at the University of Texas at Austin*, 2006.

COLLEPARDI, M. *A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 4-5, p. 401-407, 2003.

GIANNINI, E. R. *et al.* *Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. Construction and Building Materials*, v. 162, p. 253-264, 2018.

GODART, B. *Pathology, Assessment and Treatment of Structures Affected by Delayed Ettringite Formation. Structural Engineering International*, v. 27, n. 3, p. 362-369, 2017.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. **Guide technique - Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation**. Paris, 2009.

LEKLOU, N.; NGUYEN, V.; MOUNANGA, P. *The effect of the partial cement substitution with fly ash on Delayed Ettringite Formation in heat-cured mortars. KSCE Journal of Civil Engineering*. v. 21, n. 4, p. 1359-1366, 2017.

MARTIN, R. P. *et al.* *Evaluation of different techniques for the diagnosis & prognosis of Internal Swelling Reaction (ISR) mechanisms in concrete. Construction and Building Materials*, v. 156, p. 956-964, 2017.

MELO *et al.* Influência do calor de hidratação na formação da etringita tarda (DEF) em concreto de cimento Portland pozolânico. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON. **Anais...** Florianópolis, 53CBC, 2011.

MULTON, S.; SELIER, A. Expansion modelling based on cracking induced by the formation of new phases in concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 160, p. 293-306, 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2015.

NGUYEN, V. *et al.* The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 479-484, 2013.

ODLER, I. *Hydration, setting and hardening of Portland cement*. **Lea's Chemistry of cement and concrete**, p. 241-297, 1998.

RASHIDI, M. *et al.* Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 1-8, 2017.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed., London: Thomas Telford, 1997.