

CONSIDERAÇÕES SOBRE A FORMAÇÃO DE ETRINGITA TARDIA (DEF)

SOME ASPECTS RELATED TO DELAYED ETTRINGITE FORMATION (DEF)

Dione Luiza da Silva

Mestranda, Universidade de Pernambuco
dione_luiza@hotmail.com

Juliana Maria Mccartney da Fonseca

Graduada, Universidade de Pernambuco
mccartney.juliana@gmail.com

Adegilson José Bento

Graduando, Universidade de Pernambuco
adegilsonjose19@gmail.com

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Doutora, Universidade de Pernambuco
eliana@poli.br

RESUMO

Etringita é o nome do mineral formado por sulfoaluminato de cálcio que é normalmente encontrado no cimento Portland de estruturas de concreto. A formação da etringita tardia (Delayed Etringite Formation - DEF) é um tipo especial de ataque por sulfato interno, que envolve altas temperaturas de cura (acima de 70°C) e exposto a alta umidade, cuja fonte de sulfatos é o próprio cimento. Alguns pesquisadores acreditam também que o fenômeno de DEF pode causar danos em materiais sem necessitar de temperaturas elevadas, porém essa teoria ainda não está concretizada se for excluído os casos de cimento contendo altas proporções de SO₃. Sendo um problema em todo o mundo, a DEF, ocorre em determinadas circunstâncias com certos parâmetros envolvidos, como: temperatura, água, alcalinidade do concreto, fissuras iniciais do concreto, sulfato no clínquer, sulfatos e aluminatos do cimento e aditivos. O ataque pode promover principalmente a expansão e consequente fissuração, motivados pela ruptura e quebras do material, o levando à brusca degradação. Este artigo de caráter teórico tem como objetivo explorar essa problemática, fazendo um estudo sobre o tema, detalhando informações sobre o mineral, os parâmetros influentes em sua formação, danos causados pelo material e recomendações para reduzir o risco de manifestação do problema.

Palavras-chave: DEF. Concreto. Sulfato. Manifestação Patológica.

ABSTRACT

Etringite is the mineral formed by calcium sulphoaluminate which is normally found on concrete's Portland cements. Delayed Etringite Formation (DEF) is a special attack by internal sulphate which involves high curing temperatures (above 70°C) and exposed to high humidity, where the sulphates come from the cement itself. Some researches believe that the expansion by DEF can cause damage on materials with no need of high curing temperatures, but this theory is not yet confirmed if excluded cases where the concrete possesses high SO₃ proportions. Being a problem throughout the world, the DEF, occurs in certain circumstances with certain parameters involved, as follows: temperature, water, concrete's, pre-existing cracking, sulphate on clinker, sulphates and aluminates on cement and supplement materials on concrete. Several cases of damages on concrete are totally or partially due to DEF. This review rapport has a purpose of exploring the consequences of DEF, making a wide study about the topic, detailing relevant information about the mineral, influential parameters related to his formation, damage caused by the material and recommendations to lower the risk of DEF's manifestation.

Keyword: DEF. Concrete. Sulphate. Pathological Manifestation.

1. INTRODUÇÃO

Etringita é o nome do mineral formado por sulfoaluminato de cálcio que é normalmente encontrado no cimento Portland utilizado em estruturas de concreto. A formação da etringita tardia (Delayed Etringite Formation - DEF) é um tipo especial de ataque por sulfato interno, que envolve altas temperaturas de cura (acima de 70°C) e exposto a alta umidade, cuja fonte de sulfatos é o próprio cimento.

O fenômeno da formação da etringita tardia (DEF) ainda é pouco relatado na literatura brasileira. Sabe-se que não há normatização e guias nacionais de prevenção relacionados à DEF, além disso, observa-se que seus mecanismos de formação são complexos quando comparados a outras manifestações patológicas do concreto. Portanto, é necessário a realização de estudos que sirvam de embasamento para o meio técnico e científico nacional e regional sobre a importância do fenômeno da DEF e seu impacto na durabilidade e na vida útil das estruturas.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os pesquisadores garantem que a DEF se desenvolve quando a fonte de íons sulfato é interna (dentro do concreto), esses sulfatos são oriundos da utilização de um agregado que apresenta a gipsita na sua composição ou do cimento que tenha um teor de sulfato elevado, na produção do concreto. Além disso, a cura a vapor de peças de concreto acima de 65°C pode induzir a formação de etringita tardia, visto que ela não é estável acima de 65°C, decompondo-se para formar monossulfato hidratado, o qual é adsorvido pelo CSH. Posteriormente, os íons sulfatos são dissolvidos e origina a DEF causando expansão e fissuração.

Este trabalho versa sobre a formação da etringita tardia nas estruturas de concreto armado, a partir de um estudo bibliográfico sobre essa manifestação patológica. Foram pesquisados alguns casos de ocorrência desse problema a fim de demonstrar que é recorrente seu desenvolvimento, caso não seja realizado durante o processo construtivo o controle necessário para evitar sua manifestação.

2. ORIGEM E CAUSAS DO DEF

2.1 Formação da Etringita Primária e Secundária

A etringita é uma substância formada pela hidratação do concreto nos seus períodos iniciais. Existem 2 tipos principais de formação da etringita, primária e a longo prazo (secundária e tardia). A formação da etringita primária ocorre da hidratação do C_3A , onde cristais se unem com compostos hidrato de silicato de cálcio $C_3S_2H_3$ (C-S-H), durante o período de pré-cura o que não causa nenhum dano significativo, pois o concreto ainda está em estágios iniciais. (SHYMADA et al. 2005 apud BRYANT, 2011).

Briant (2011) aponta que em temperaturas acima de $70^{\circ}C$ a etringita primária converte-se para monossulfato que com a sua presença, é fornecido o cálcio e íons de alumínio necessário para o processo de formação do etringita secundária e tardia. A formação da etringita secundária é desencadeada pela diminuição da solubilidade da etringita a partir da diminuição da alcalinidade do sistema e temperatura. Mesmo com morfologia similar à DEF, essa etringita se forma sem temperaturas elevadas durante a cura inicial, e não produz efeito de expansão.

2.2 Formação da Etringita Tardia (DEF)

A formação da etringita tardia é um problema de expansão das partes do concreto e que causa o desenvolvimento de fissuras (DIAMOND, 1996). Para alguns autores, a decomposição térmica da etringita primária durante a cura a quente acima de certas temperaturas e a subsequente recristalização como etringita secundária durante o resfriamento e em condições úmidas é o que governa a DEF. Outros, consideram quando a etringita forma-se a longo prazo (meses ou anos) é que a expansão produz fissuras e lascamento (SHYMADA et al. 2005 apud BRYANT, 2011).

O fenômeno da DEF só acontece somente quando 3 condições básicas estão presentes conjuntamente: presença de sulfato no cimento em excesso, alta temperatura de cura ($>70^{\circ}C$ para maioria dos autores) e suplementação de água. Tendo como principais sintomas: fissuras multidirecionais entre 20 mm ou 50 mm interconectadas entre si e preenchidas com grandes cristais de etringita (DIAMOND, 1996 apud MELO, 2010).

2.3 Diferenças entre DEF e Reação Álcali-agregado

Para Shymada et al. (2005), é importante entender a diferença entre esses dois mecanismos, devido a coexistência de ambos os problemas em campo apresentam sintomas característicos parecidos. O Quadro 1 evidencia alguma dessas características.

Quadro 1 – Diferenças entre DEF e reação álcali-agregado.

Características	Formação de etringita tardia (DEF)	Reação álcali-agregado (ASR)
Sensibilidade	É sensível a temperatura do concreto e ao ambiente (como presença de água e umidade relativa).	É sensível a materiais específicos usados no concreto.
Formação	Se forma a partir do produto da hidratação do cimento	Se forma a partir da interação entre íons hidróxidos numa solução porosa e sílica reativa nas partículas do agregado.
Expansão	Expansão menor e tardia	Expansão imediata logo após a cura a quente.

Fonte: Autores (2016).

Thomas et al. (2008) defendem que a larga expansão imediata logo após a cura é totalmente devido a ASR enquanto a expansão tardia pode ser parcialmente devido a DEF. Segundo Bryant (2011), a reação álcali-agregado não um pré-requisito para ocorrência da DEF.

2.4 Fonte de Sulfatos

Os ataques por sulfatos podem ser externos (conhecido como ESA) ou internos (conhecido como ISA). Para Collepari (2003), a ESA ocorre quando há a associação de três fatores: ambiente rico em sulfatos, permeabilidade e presença de água, enquanto a ISA ocorre quando há: microfissuração e liberação tardia de sulfato na presença de água. Sendo ainda para ele a DEF a formação de etringita no material já endurecido, independente da temperatura de cura.

2.5 Mecanismos de Expansão

Com relação aos mecanismos de expansão, Melo (2010) e Bryant (2011) apontaram as duas teorias principais para explicar o fenômeno.

A hipótese de crescimento por pressão do cristal relata que a tensão gerada a partir do crescimento dos cristais de etringita em superfícies de partículas são a causa das fissuras. Para Diamond (1996, apud MELO, 2010) a formação da etringita tardia está relacionada com o alto teor de sulfato contido no cimento mais do que às altas temperaturas de cura. Estudos como Leklou e Escadeillas (2008) mostraram que a etringita na interação entre pasta-agregado é encontrada no início e que esta seria a causa de níveis baixos de expansão. Quando os níveis de expansão aumentam, a etringita é encontrada na zona de transição sob a forma de bandas.

A outra hipótese (expansão uniforme da pasta) sugere que aberturas são formadas devido a expansão da pasta de cimento antes da formação da etringita no ponto de encontro. A tensão depende da geometria do cristal e do seu contorno e a força que causa o crescimento de um cristal é gerada pela supersaturação. Sendo a pressão significativa para raios menores do que 100 nm (TAYLOR et al., 2001 apud MELO, 2010). A etringita recristaliza nas novas fissuras formadas sem causar expansões adicionais, devido ao baixo grau de saturação (TAYLOR et al., 2001).

2.6 Fatores de influência na expansão por DEF

O processo que causa a DEF ainda não é totalmente entendido, mas sabe-se como o entendimento dos mecanismos influentes na DEF podem assegurar a sua erradicação nas estruturas de concreto.

Composição do Cimento: A quantidade de C_3S , C_3A , SO_3 , MgO e a finura do cimento são fatores significantes para formação de etringita tardia com expansão. Para Cigrovski (2011) a composição do cimento não acelera o processo de DEF, porém é influência na expansão geral. Sendo para Melo (2010) a quantidade de SO_3 , relação SO_3/Al_2O_3 e finura do cimento os mais relevantes na expansão.

Relação Água/Cimento: Um aumento do potencial para ocorrência de DEF é perceptível em argamassas com menores relações água/cimento devido possivelmente a maior quantidade de cimento (BRYANT, 2011). Shymada et al. (2005) citam que a argamassa pode sofrer alterações na hidratação devido alterações na relação água/cimento.

Propriedades do Agregado: Alguns pesquisadores detectaram que um aumento na área específica do agregado promove a DEF e a expansão (TOSSUN, 2006; FU et al., 2006 apud BRYAN, 2011). Shymada et al., (2005) explicam que isso se dá porque o controle das características de preenchimento é influenciado pelo tamanho do agregado, assim quanto maior for a área específica maior será a possibilidade da formação de etringita e a expansão. Bryant

(2011) afirma que qualquer coisa que enfraqueça o material irá diminuir sua capacidade de resistir a expansão.

Quantidade de Álcalis: Com relação a DEF, Martin et al. (2012) citam que a presença de álcalis diminui a estabilidade da etringita. Desse modo, durante o tratamento térmico necessário para ocorrência da DEF a presença de álcalis reduzirá a formação de etringita primária liberando sulfatos nos poros do concreto ou adsorvido pelo C-S-H. Esses sulfatos servirão como reagente para formar etringita no material endurecido após o esfriamento. Assim, a presença de álcalis no material em idades iniciais pode desenvolver a DEF.

Fissuras Pré-existentes: Para Collepari (2003), as fissuras pré-existentes são um parâmetro importante para entender a expansão por DEF. Ele explica que estas podem vir de várias fontes, a citar: reação álcali-agregado, altas tensões localizadas, cargas dinâmicas em serviço, retração plástica e etc. Diamond (1996, apud BRYAN, 2011) explica que poros pequenos e mal conectados, também causam um crescimento na DEF.

Condições de cura e de armazenamento: As condições de cura podem modificar os tipos de hidratos formados para um mesmo cimento, contribuindo para DEF, sendo os principais parâmetros influentes: a temperatura máxima de cura, taxa de elevação da temperatura, período de pré-cura, umidade e CO₂ (MELO, 2010). O tempo de pré-cura ótimo é considerado perto de 4 horas, acima desse tempo, há formação de cristais de monossulfato e restrições na expansão podem ocorrer. Muitos pesquisadores encontraram que expansões só ocorrem se a cura for realizada acima de 70°C, porém alguns identificaram que temperaturas acima de 100°C pode reduzir o período de indução de expansão, mas aumenta a expansão final.

Aditivos: Em algumas pesquisas, foi demonstrado que algumas adições pozolanas e escória podem reduzir, ou mesmo suprimir, a expansão em argamassas curado por calor, quando utilizado como um substituto parcial para o cimento. Nguyen (2013) conclui que não só a adição pozolana, como também o uso de pozolana mais fina resulta em expansões menores. Escórias e cinzas volantes também provaram diminuir a expansão por DEF.

3. DIAGNÓSTICO DO DEF

Não existe norma ASTM (American Society of the International Association for Testing and Materials) ou testes pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) para avaliar o potencial do DEF (BAUER et al., 2006). Torres e Andrade (2016) afirmam que seguindo essa mesma linha, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também não possui um método de teste para avaliação da DEF em materiais cimentícios. Por isso, os pesquisadores continuam buscando desenvolver métodos capazes de diagnosticar a DEF em amostras de laboratório.

3.1 Teste de Duggan

Day (1992, apud BAUER, 2006) estabelece os procedimentos principais do Teste.

Neste teste os Núcleos de concreto (no mínimo 5) de 25 mm de diâmetro e cortados em comprimentos de 50 mm em extremidades com bases lisas e paralelas. Têm o comprimento inicial medido com um comparador antes do começo do tratamento por calor. Os núcleos são molhados durante 3 dias em água destilada a 70°C num recipiente fechado e são em seguida, colocados numa câmara de secagem a 82°C durante um dia.

Os núcleos são retirados da câmara, deixa-os esfriar durante 1 hora, depois são colocados de volta em água destilada durante 1 dia. Sendo executado um segundo aquecimento e ciclo de imersão de 1.

Um terceiro ciclo é realizado, mas desta vez os núcleos são deixados na estufa a 82°C durante 3 dias.

No final do terceiro ciclo de aquecimento, os núcleos são retirados da câmara e deixa-se esfriar durante 1 hora, e, em seguida, são retiradas medições de comprimento em relação a um aço padrão. Nos primeiros ensaios de Duggan e Scott esta medida foi usada como o ponto zero para mais leituras de deformação.

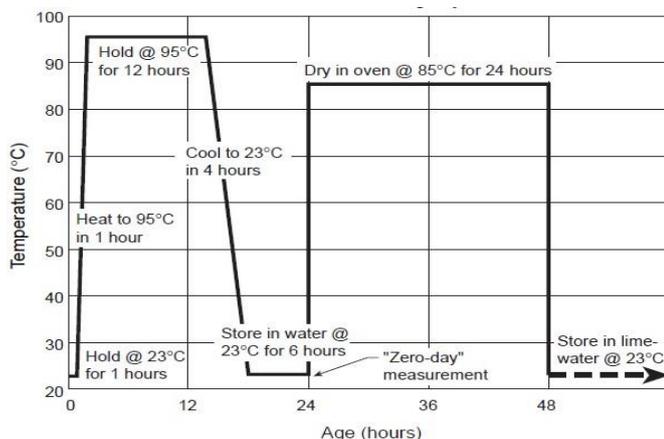
Os núcleos são colocados em água destilada a 21°C. Sendo as medições de comprimento feitas em relação ao padrão de aço em intervalos de 3 a 5 dias.

Bauer et al. (2006) acreditam que este teste está sendo progressivamente abandonado mesmo tendo servido como base e melhoria de novos testes como o método de Kelham e de FU.

3.2 Método de FU

Neste método, as amostras de argamassa são preparadas usando areia de sílica e cimento portland, com uma proporção de cimento/areia de 0,36 e uma água/cimento de 0,48. As amostras então são curadas por 1 h em câmara de 23°C. Os moldes contendo as amostras de argamassa são então aquecidos a 95°C durante 12h e esfriados até a temperatura ambiente ao longo de um período de 4h. Em seguida, as amostras de argamassa são então desmoldadas e armazenadas em água durante 6 horas a 23°C antes de registrar leitura nula de comprimento. Por fim, são então armazenadas em água de cal a 23°C, e o comprimento é monitorizado durante 56 dias (DAYARATHNE et al., 2013) (Figura 1)

Figura 2 - Método de FU para avaliar DEF.



Fonte: BAUER et al. (2006)

3.3 Métodos de Mitigação

Bauer et al. (2006) cita que muitas agências internacionais utilizam limite de temperaturas no concreto ou na argamassa durante a cura acelerada para ajudar na prevenção da DEF (Quadro 2).

Quadro 2 – Especificações Internacional de Cura Acelerada.

País	Agência/Especificação	Temperatura Máxima	Aplica-se no:	Outros comentários
Canadá	CSA/A23.4-94	70°C	Concreto	
Dinamarca	DS482 (projetos a partir de jan. 1999)	70°C	Concreto	Concreto deve ser deixado por 4 horas sem calor adicional

Inglaterra	Manual de documentos de contrato para trabalhos em rodovias	70°C	Concreto	Configuração inicial necessária antes da aplicação de calor
Alemanha	Comitê de concreto armado	60°C	Concreto	Limites de temperatura ambiente também se aplicam
África do Sul	SABS/0100-2:1992	60°C	Vapor	
Espanha	UNE/83-301-91	70°C	Não especificado	

Fonte: Adaptado de BAUER et al. (2006)

3.4 Testes não destrutivos

Inspeção visual: A inspeção visual é um dos mais simples testes não destrutivos e é normalmente o primeiro passo em qualquer investigação de uma estrutura. Gianini et al. (2013) aponta que em praticamente todos os casos de estudos de DEF inclui a descrição de alguns sintomas que são observáveis através de inspeção visual, como: fissuração, marcas de gel e exsudação, descolamentos, juntas de expansão, etc.

Monitoramento da expansão: Esse tipo de método, envolve a instalação de equipamentos de medir pontos para usar com medidores de tensão mecânicos ou simplesmente medidores de tensão na superfície do concreto. Enquanto o controle de expansão não pode auxiliar na avaliação expansões que já ocorreram, as medições ao longo de vários anos são úteis para determinar a taxa atual de expansão, que é uma parte crítica de informações para determinar como gerenciar a estrutura (GIANINI et al., 2013).

Método por propagação de ondas: Esse método, utiliza vários tipos de onda para investigar falhas no concreto. Neste artigo, citaremos quatro principais, como mostra Gianini (2013). Ondas de compressão ou ondas P: as ondas de compressão oscilam paralelamente à direção de propagação ao mesmo tempo comprimindo e dilatando o material. Ondas de cisalhamento ou ondas S: as ondas de cisalhamento induzem vibrações perpendicular ao sentido do movimento e se movem mais lentamente do que as ondas de compressão. Ondas de superfície ou ondas R: as ondas de superfície, como o seu nome indica, se propagam ao longo da superfície de um meio, induzindo movimento das partículas elípticas. A principal influência sobre as ondas de superfície em concreto são as condições da superfície, uma vez que energia das ondas de superfície diminui rapidamente com a profundidade.

3.5 Outros métodos

Talley et al. (2016) apresentaram um método até então diferente dos anteriores de aproximar os danos causados por reações álcali-agregado (ASR) e formação de etringita tardia (DEF). Enquanto os outros testes baseavam-se em entender a ciência dos materiais por trás dos mecanismos, este faz comparações da performance mecânica de pilares fissurados e pilares de concreto afetados com ASR e DEF. O estudo concluiu que apesar de algumas variações em deformação e deslocamento de considerável importância, no geral, corpos de prova de fissuras mecânicas aparentam ser uma forma viável de aproximar a capacidade estrutural de concretos afetados por ASR/DEF.

4. PREVENÇÃO PARA ATAQUES POR DEF

Godart e Divet (2008) sugerem recomendações expressivas para prevenção de concretos especificamente para ataques por DEF. Segundo a apostila técnica criada pelos autores, são estabelecidos níveis de prevenção que necessitam também de alguns parâmetros, como: Categoria da estrutura – considera-se seus níveis de segurança e suas finalidades e Condições de umidade do ambiente – considera-se ciclos de secagem e molhagem, contato com a água.

Os níveis de prevenção sugeridos são: As, Bs, Cs, Ds. Todos estes basicamente funcionam em limitar a temperatura máxima do concreto. Para estimar essas temperaturas, são sugeridos alguns métodos como o uso de um código em elementos finitos e incluindo o calor liberado pelo concreto durante ensaios.

Para o nível de prevenção As, a temperatura máxima atingida pela estrutura deve se manter abaixo de 85°C, podendo chegar até 90°C se a temperatura acima de 85°C não passar de 4h.

Para o nível de prevenção Bs, a temperatura máxima atingida pela estrutura deve se manter abaixo de 75°C. Para o nível de prevenção Cs, a temperatura máxima atingida pela estrutura deve se manter abaixo de 70°C. Para o nível de prevenção Ds, a temperatura máxima atingida pela estrutura deve se manter abaixo de 70°C. Nesses casos não podendo exceder até 10°C ou 5°C, no caso de Ds e pelo menos uma das seis outras condições escritas na apostila técnica para a prevenção respectiva ao nível deve ser satisfeita, com relação a composição do concreto, tipo de cimento ou até controle de tempo de temperaturas altas.

Outras medidas preventivas são sugeridas por Godart e Divet (2008), com relação a fabricação e composição do concreto; ao projeto e execução das estruturas e até o próprio lançamento do concreto. Todas essas, com objetivos de controle de temperatura a fim de não ter risco de desenvolvimento da DEF. Outros estudos recentes apontam estratégias semelhantes de prevenção para formação da etringita tardia. Myuran et al. (2015) utilizaram um software (CIRIA C660) que faz a previsão das temperaturas de pico de várias classes concreto dentro de uma pequena margem de erro.

5. PROGNÓSTICO

Silva et al. (2010) fornecem recomendações básicas para o prognóstico de concretos danificados por ASR\DEF. Essa ação é importante pois, informa que áreas da estrutura priorizar com relação a reparação.

Realização de testes adicionais para avaliar a expansão residual do concreto, utilizando partes do núcleo da estrutura. O diâmetro recomendado para investigação das partes do núcleo é de 100mm e o comprimento do núcleo deve representar o interior do elemento de concreto (para grandes elementos, o mínimo deve ser 600mm). A extração deve ser realizada em diferentes zonas da estrutura, evitando interceptação com fissuras ou barras de reforço (aço).

Observar e medir o comprimento e altura de fissuras para avaliar o crescimento da DEF na estrutura quando o diagnóstico indicar o potencial de existir expansões futuras.

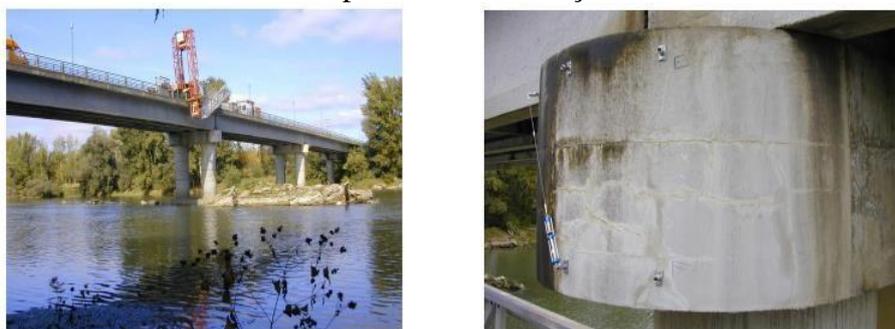
6. CASOS DE DANOS POR DEF

Silva et al. (2010) estudaram a degradação de pontes de concreto em Portugal, onde investigou reações de expansões devido a ASR e DEF. Os autores utilizaram um microscópio eletrônico para realizar o diagnóstico, que confirmou a causa da degradação das pontes A e B por ASR e DEF. Para o prognóstico, realizou outros 2 testes para verificar a expansão residual do concreto.

Godart e Divet (2013) investigaram diversas pontes que apresentavam danos aparentes em sua estrutura. Nessa investigação ele levou em consideração alguns dados que foram medidos e comparados como composição do concreto das pontes, temperatura máxima, ambiente, entre outros.

Como estratégia para prevenção, Godart e Divet (2013) utilizaram as recomendações francesas criadas por eles mesmos em 2008, já mencionadas nesse artigo, conhecidas pela limitação da temperatura máxima e os níveis de prevenção. As Figuras 2 à 4 as manifestações patológicas em algumas das pontes investigadas.

Figura 3– A esquerda visão geral da ponte e a direita visão do fim da viga da ponte Ondes com possível deterioração



Fonte: GODART e DIVET (2013)

Figura 4 - A esquerda a visão geral da ponte e a direita a visão da base da ponte Bourgone afetada por DEF



Fonte: GODART e DIVET (2013)

Figura 5 - A esquerda a visão geral da ponte e a direita a visão do pilar da ponte Bellevue com fissuras, afetado por respingo de maré.



Fonte: GODART e DIVET (2013)

7. CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto ao longo do trabalho é possível entender que a formação da etringita tardia é uma manifestação patológica recorrente nas estruturas de concreto, estando associada a três condições básicas (presença de água, temperatura elevada e presença de sulfatos). Observou-se também, que não existe norma que determine o potencial da DEF, Por isso, os pesquisadores até hoje continuam buscando desenvolver métodos capazes de diagnosticar o DEF em amostras de laboratório. Vale destacar que a DEF possui características similares as da RAA, com isso a determinação do seu diagnóstico pode ser ainda mais dificultada.

Porém, foi sugerido algumas recomendações expressivas para prevenção de concretos especificamente para ataques por DEF, levando em consideração algumas características da estrutura e as condições de umidade do ambiente. Essas recomendações deixam claro a importância do controle da temperatura do concreto como forma mitigadora da ocorrência da DEF.

O artigo pode servir de ferramenta para disseminar o conhecimento mais aprofundado dessa manifestação patológica, contribuindo de forma substancial para o meio técnico do setor da construção civil e dessa forma, contribuir também para garantir a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAUER, S. CORNELL, B. FIGURSKI D. LEY, T. MIRALLES J. and DR. KEVIN FOLLIARD. **Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: A Literature Review**, 2006.
- GODART B., Loc Divet. **Recommendations for preventing disorders due Delayed Ettringite Formation. Guide technique**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France. Pp 1-63, 2008.
- GODART B., Loc Divet. (2013) **Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy**. Fifth international conference on Forensic Engineering, Institution of Civil Engineers, Apr 2013, France. 12p, 2013.
- BRYANT, B. **Expansion of cementitious mortars due to delayed ettringite formation**. Thesis for Master of Science in Civil Engineering. Tennessee Technological University, 2011.
- COLLEPARDI, MA. **state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete**. Cement and Concrete Composites. Vol. 25, pp. 401-407, 2003.
- DAY, R. L. **The Effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A Literature Analysis**. Diss. The University of Calgary, 1992. Calgary, Alberta, 1992.
- DIAMOND, S. **Delayed Ettringite Formation - Processes and Problems**. Cement and Concrete Composites. Vol. 18, pp. 205-215, 1996.
- GIANNINI, E.; FOLLIARD, K.; ZHU, J.; BAYRAK, O.; KREITMAN, K.; WEBB, Z. AND HANSON B. **Non-Destructive Evaluation of In-Service Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reaction (ASR) or Delayed Ettringite Formation (DEF)**, 2013.
- FU, Y. (1996) **Delayed Ettringite Formation in Portland Cement Products**. Diss. University of Ottawa, 1996. Ottawa, Ontario.
- TORRES, I. F. E ANDRADE. T. **Análise de risco da formação de etringita tardia em blocos de fundação na região metropolitana de Recife – PE – Brasil**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Volume 9, Número 3. 357 – 394 Pp, 2016.

- KIMBERLY, G.; TALLEY, J. G. K. AND JOHN E. B. **Method for Approximation of ASR/DEF Damage in Concrete Columns**. Aci Structure Journal. Title No. 113-S10. Pp 1-7, 2016.
- LEKLOU, N.; AUBERT, J. AND ESCADEILLAS, G. **Microscopic observations of samples affected by delayed ettringite formation (DEF)**. Materials and Structures, 2008.
- MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, UFG, Goiânia, 2010.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ed. IBRACON, 2008.
- MYURAN, K.; WANIGARATNE, N.S.A. & JAYASINGHE, M.T.R. **Strategies for Prevention of Delayed Ettringite Formation in large Concrete Sections**. Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka. 48(2), pp.1–13, 2015. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v48i2.6829>
- MARTIN R.P.; BAZIN C.; TOUTLEMONDE, F. **Alkali aggregate reaction and delayed ettringite formation: common features and differences**. 14th International conference on alkali aggregate reaction ICAAR14, May 2012, France. 10 p, 2012.
- SHIMADA, Y.; JOHANSEN, V.; MILLER, F. AND MASON, T. **Chemical Path of Ettringite Formation in HeatCured Mortar and Its Relationship to Expansion: A Literature Review**. Portland Cement Association. pp. 1-7, 2005.
- SILVA, A. S.; GONÇALVES, A. e SALTA, M. **Degradation of Concrete Bridges by Internal Expansive Reactions – Portuguese Case Studies**. Materials Department, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, 2010.
- TAYLOR, H.; FAMY, C. AND SCRIVENER, K. **Delayed Ettringite Formation**. Cement and Concrete Research. Vol. 31, pp. 683-693, 2001.
- THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T. **Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structure**. Cement and concrete research, v. 38, p.841-847, 2008.
- TOSUN, K. **Effect of SO₃ content and fineness on the rate of delayed ettringite formation in heat cured Portland cement mortars**. Cement and Concrete Composites, 2006.
- VAN-HUONG NGUYEN, NORDINE LEKLOU, JEAN-EMMANUEL AUBERT, PIERRE MOUNANGA. **The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars**. Construction and Building Materials 48 (2013) 479–484, 2013.
- DAYARATHNE, W. H. R. S.; GALAPPATHTHI, G. S.; PERERA K. E. S.; NANAYAKKARA, S. M. A. **Evaluation of the potential for delayed ettringite formation in concrete**. National engineering conference 2013, 19th Eru symposium, Faculty of Engineering, University of Moratuwa, Sri Lanka, 2013.