

Avaliação do comportamento de concretos ao longo do tempo frente às reações expansivas causadas por RAA e DEF
Evaluation of behavior of concretes subjected to expansive reactions such as ASR and DEF

Jeferson L. Bronholo (1); Nicole P. Hasparyk (2); Kleber F. Portella (3); Mariana O. G. P. Bragança; (4) Betina L. Medeiros (5); Selmo C. Kuperman (6)

(1) Mestrando em Engenharia Civil, LACTEC; (2) Doutora em Engenharia Civil, ELETROBRAS Furnas; (3) Doutor em Ciências, LACTEC; (4) Doutora em Engenharia e Ciências dos materiais, LACTEC; (5) Mestre em Engenharia Civil, LACTEC; (6) Doutor em Engenharia Civil, DESEK

Resumo

As reações expansivas mais conhecidas em estruturas de concreto são a reação álcali-agregado (RAA) e a formação da etringita tardia (*delayed ettringite formation, DEF*). A RAA e, mais especificamente, a reação álcali-silica (RAS), gera um gel expansivo em função da presença de alguns minerais potencialmente reativos nos agregados, do tipo de aglomerantes e da umidade. As estruturas atacadas apresentam o desenvolvimento de tensões e fissuras progressivas e a sua deterioração. As fissuras por DEF são formadas geralmente em concretos fabricados com elevada cura térmica ou que atingiram elevadas temperaturas de lançamento, da ordem de 60°C ou superiores. DEF relaciona-se à decomposição da etringita já formada na hidratação inicial do cimento e a sua cristalização tardia, após o resfriamento, e acontece ao longo do tempo, nas interfaces entre os agregados e a pasta, causando também tensões internas nos elementos concretados. Nesta pesquisa, como parte integrante de um programa de P&D ANEEL (parceria FURNAS e LACTEC), foi realizado o monitoramento de corpos de prova submetidos à elevada temperatura por cura térmica, seguida de exposição a um ambiente específico controlado de laboratório, a fim de avaliar o potencial de expansão dos concretos frente aos ataques por DEF e RAS. Esse trabalho apresenta os resultados obtidos com relação ao potencial de expansão e à evolução das propriedades mecânicas de concretos moldados com dois tipos de cimentos, CPV e CPIV, ao longo do tempo, e em idades avançadas de laboratório. Até a idade avaliada de 9 meses já foram observadas evidências das reações expansivas. A divulgação desses dados visa contribuir para a definição de metodologias laboratoriais que auxiliem na diferenciação das reações expansivas no interior do concreto, como a RAA e a DEF, e de formas de mitigação.

Palavra-Chave: RAA, DEF, expansão, propriedades, metodologias laboratoriais.

Abstract

The most known expansive reactions in concrete structures are AAR and DEF. The alkali-aggregate reaction (AAR), and more specifically the ASR (alkali-silica reaction), promotes the formation of an expansive gel depending on the cement type, the reactive minerals present in the aggregates and moisture. As consequences it can be pointed out progressive tensions and cracks, leading the structures to deterioration. Cracks involving expansive reactions from Delayed Ettringite Formation (DEF) is related to both situations: concretes exposed to high thermal curing at the first ages after casting, or concretes that reach high internal temperatures, and above 60°C. In those situations, primary ettringite from cement hydration decomposes and after concrete cooling, over time this product forms lately. Delayed ettringite usually forms at the interfaces between aggregates and paste, causing internal tension in the concrete elements. In this research, as part of an ANEEL R&D program (FURNAS and LACTEC partnership), the monitoring of specimens submitted to high temperature by thermal curing was carried out, followed by a controlled exposure environment at laboratory in order to assess the potential for expansion of concretes by DEF and RAS. This work presents the results obtained in relation to the potential for expansion and the evolution of mechanical properties of concretes cast with two types of cement (CPV and CPIV), over time, and at later ages. Evidences of expansive reactions were detected up to 9 months of the study. In addition to the above mentioned, these results can contribute to the definition of laboratory methodologies that assist in the distinction of expansive reactions such as AAR and DEF and also to mitigative measures.

Keywords: AAR, DEF, expansion, mechanical properties, lab methodologies.

1 Introdução

A RAA-reação álcali-agregado é definida por reação química que ocorre no interior das estruturas de concreto, ocasionada pela interação entre os hidróxidos alcalinos, provenientes na maioria dos casos do cimento Portland utilizado, os minerais contendo sílica reativa existente nos agregados e a presença de umidade. O produto da reação formado é um gel alcalino na presença de umidade expande, gera tensões internas e consequentes fissurações, bem como deslocamentos nos elementos concretados. A RAS-reação álcali-sílica é a mais conhecida e difundida no meio técnico (HASPARYK, 2005). As características visuais desse tipo de reação são as fissurações do tipo “mapa”, preenchidas com material branco ou vítreo, em poros próximos dos agregados e em suas bordas, exsudação e na superfície do concreto, gel, microfissurações e deslocamentos.. Em estruturas de usinas hidrelétricas implicam em abertura ou o fechamento de juntas de dilatação, abertura de juntas de construção, que podem vir acompanhadas de fissuras horizontais, fissuração de vigas e lajes, além de desalinhamento e movimentações por expansões que podem interferir na operação de equipamentos essenciais para a manutenção do funcionamento das usinas, como turbinas e comportas (PAULON, 1981; ANDRIOLO, 1997; HASPARYK, 2005; METHA e MONTEIRO, 2014; SILVA, 2006; HASPARYK, 2011).

A DEF, assim como a RAA, pode ser definida como uma reação química que ocorre no interior de compósitos a base de cimento Portland, levando-os à deterioração prematura, porém, sem a formação do gel. É caracterizada pela expansão gerada internamente à pasta cimentícia devido à formação da etringita secundária, quando os compósitos já se encontram no estado endurecido, geralmente, devido a processos de cura térmica inicial com temperaturas acima de 60°C, levando o concreto à fissuração e comprometendo a durabilidade da estrutura atacada (BAUER *et al.*, 2006). A DEF também pode ocorrer por meio da geração elevada de calor no interior do concreto, a partir de reações químicas, quando um cimento contém elevado calor de hidratação, altos consumos de aglomerante cimentício, entre outros (MELO, 2010; HASPARYK e KUPERMAN, 2019).

A potencialidade de ocorrência da DEF pode ser relacionada com as quantidades de sulfato e alumínio existentes no aglomerante. A relação entre (SO_3/Al_2O_3) e o teor de sulfatos existentes nos cimentos Portland, com valores acima de 0,50 e 3%, respectivamente, são propícios para a formação da DEF, além das relações de $(SO_3)^2/Al_2O_3$ superiores a 2, que também indicam susceptibilidade para sua ocorrência (HEINZ *et al.*, 1999; BAUER *et al.*, 2006). São vários os fatores influentes para a ocorrência da DEF, entre eles, a exposição a temperaturas elevadas (acima de 60-65°C), principalmente nas primeiras horas após a concretagens, a presença de umidade, para possibilitar as reações químicas e trocas iônicas no interior dos poros e fissuras saturadas, e a composição química do cimento, em especial o teor de C_3A , fonte da alumina e a quantidade de SO_3 , geralmente oriundo da gipsita, adicionada para regular a pega dos compostos (BAUER *et al.*, 2006; GODART *et al.*, 2013; RASHIDI *et al.*, 2017; KCHAKECH *et al.*, 2016; GAMBALE *et al.*, 2019).

Com base no exposto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência isolada da RAA e da DEF na resistência à compressão, nos módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos, nas expansões lineares em prismas de concreto e nas velocidades de propagação de ondas de ultrassom, por meio de um programa experimental específico, desenvolvido em ambiente laboratorial. Esse trabalho é parte integrante de um estudo maior, desenvolvido por FURNAS/LACTEC, por meio de um projeto de P&D ANEEL.

2 Programa Experimental

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar a ocorrência da RAA e da DEF, de forma isolada, em concretos produzidos em ambiente laboratorial, utilizando dois tipos de cimento Portland (CPV e CPIV), com consumo de 471 kg/m³ e relação água/cimento de 0,46. Para a primeira condição, utilizou-se um agregado graúdo potencialmente reativo para RAS de origem granítica, e os corpos de prova cilíndricos (CPs), moldados nas dimensões de 100 x 200 mm, ficaram mantidos em cura imersa a 38°C ao longo do tempo. Já para a avaliação da DEF isolada, utilizou-se um agregado potencialmente inócuo para RAS, de mesmo litotipo, além de ciclos de cura térmica, com patamar máximo de temperatura de 85°C, antes da imersão a 38°C, sendo todos mantidos até as datas de controle (3, 7, 28, 90, 180 e 270 dias). Para ambas as condições, foi utilizado agregado miúdo, de cava natural, potencialmente inócuo para RAS, conforme a NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

2.1 Materiais

2.1.1 Cimentos

Na Tabela 1 e na Tabela 2 estão apresentadas as caracterizações químicas e físicas dos cimentos utilizados na pesquisa e os limites estipulados pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 1 - Caracterização química dos cimentos.

Caracterização química			Tipos de Cimento Portland		
Parâmetros			CP V-ARI		CP IV-32
			Resultado	Requisito*	Resultado
Al ₂ O ₃	%	4,50	-		8,40
SiO ₂	%	19,10	-		27,00
Fe ₂ O ₃	%	2,90	-		3,50
CaO	%	61,30	-		48,20
MgO	%	2,80	≤ 6,50		2,50
SO ₃	%	3,50	≤ 4,50		2,50
K ₂ O	%	0,70	-		1,10
Na ₂ O	%	0,20	-		0,30
Perda ao fogo	%	4,03	≤ 4,50		3,60
CaO livre	%	0,79	-		0,67
Resíduo insolúvel	%	0,98	≤ 1,00		26,07
SO ₃ /Al ₂ O ₃	-	0,78	-		0,30
Na ₂ O _{eq.} = 0,658.K ₂ O+Na ₂ O	%	0,66	-		1,02
Calor de hidratação**	J/g (41 h)	376,3	-		271,6

* Requisitos estipulados pela ABNT NBR 16697:2018

**A ABNT NBR 16697:2018 classifica cimentos de baixo calor de hidratação com resultados menores que 270 J/g em 41 horas

Tabela 2 – Caracterização física dos cimentos.

Caracterização física		Tipos de Cimento Portland			
		CP V-ARI		CP IV-32	
Parâmetros		Resultado	Requisito*	Resultado	Requisito*
Massa específica	g/cm ³	3,08	-	2,82	-
Expansão à quente	mm	0,00	≤ 5,00	0,00	≤ 5,00
Tempo início de pega	h:min	03:20	≥ 1,00	04:20	≥ 1,00
Tempo fim de pega	h:min	05:25	≤ 10,00	05:40	≤ 12,00
Consistência normal	%	29,90	-	31,20	-
Finura blaine	cm ² /g	4.720	≥ 3.000	4.280	-
Resíduo peneira # 200	%	0,00	≤ 6,00	0,50	≤ 8,00
Resíduo peneira # 325	%	0,30	-	2,80	-

* Requisitos estipulados pela ABNT NBR 16697:2018

Com base no referencial teórico levantado e a caracterização físico-química dos cimentos, foi possível verificar que ambos poderiam ser utilizados no desenvolvimento da pesquisa, pois estes (CP V e CP IV) atenderam aos requisitos mínimos estipulados na NBR 16697 (ABNT 2018) e, principalmente, pelas características químicas do CP V, com alto calor de hidratação, elevada relação (SO_3/Al_2O_3) superior a 0,50 (0,78) e teor de sulfato superior a 3% (3,5%) (HEINZ *et al.*, 1999; BAUER *et al.*, 2006), características favoráveis para o desenvolvimento da DEF.

2.1.2 Agregado miúdo

A areia de cava natural utilizada na confecção dos concretos tem as características de areia média e é potencialmente inócua para a RAS segundo a metodologia da NBR 15577-4 (ABNT, 2018), conforme a Figura 1. Possui módulo de finura de 2,72 e dimensão máxima característica ($D_{máx}$) de 4,8 mm. A absorção de água da areia é de 1,2%, a massa específica igual a 2,60 g/cm³, o teor de material pulverulento de 0,7% e teor de argila em torrões igual a 0,04% (ABNT NBR NM 30:2001; ABNT NBR NM 52:2009; ABNT NBR NM 46:2003 e ABNT NBR 7218:2010).

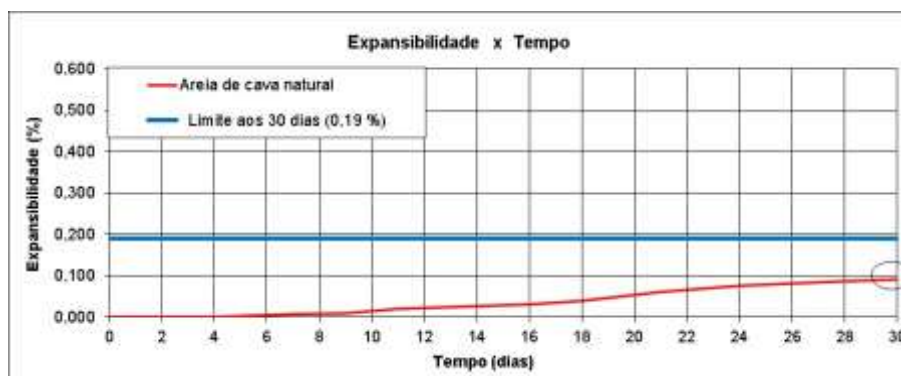


Figura 1– Expansão ao longo de 30 dias – Areia natural (FURNAS, 2019)

2.1.3 Agregados graúdos

Para o desenvolvimento do estudo, foram selecionados dois tipos de agregado graúdo com $D_{\max}$ de 25 mm. Um deles, de origem granítica e coloração cinza clara a rosada, classificado como potencialmente inócuo para RAS segundo o ensaio acelerado em barras de argamassa, com expansão média de 0,07%, aos 30 dias. O outro agregado graúdo, reativo, utilizado na pesquisa também é de origem granítica, ambos originários da região metropolitana de Recife/PE. O agregado reativo possui coloração cinza clara, sendo classificado como potencialmente reativo para RAS pela NBR 15577/4, e também por dados de campo. Esse agregado apresenta teor superior a 5% de quartzo deformado e mais de 15% de quartzo microgranular, além de elevadas expansões no ensaio acelerado (0,39%), conforme Figura 2. As caracterizações físicas para o agregado classificado como potencialmente inócuo demonstraram um $D_{\max}$ de 19,0 mm e módulo de finura de 6,32. Já, para o potencialmente reativo, os resultados obtidos foram $D_{\max}$ de 19,0 mm e módulo de finura igual a 6,60. Além da classificação granulométrica, foram executadas as seguintes determinações com os agregados graúdos: massa específica (2,66 e 2,64 g/cm³) e absorção de água (0,6 % para ambos); teor de material pulverulento (0,7 e 0,9 %), índice de forma (1,7 e 1,6) e de abrasão Los Angeles (32 e 19 % de desgaste), respectivamente (ABNT NBR NM 53:2009; ABNT NBR NM 46:2003; ABNT NBR 7809:2019; ABNT NBR NM 51:2001).

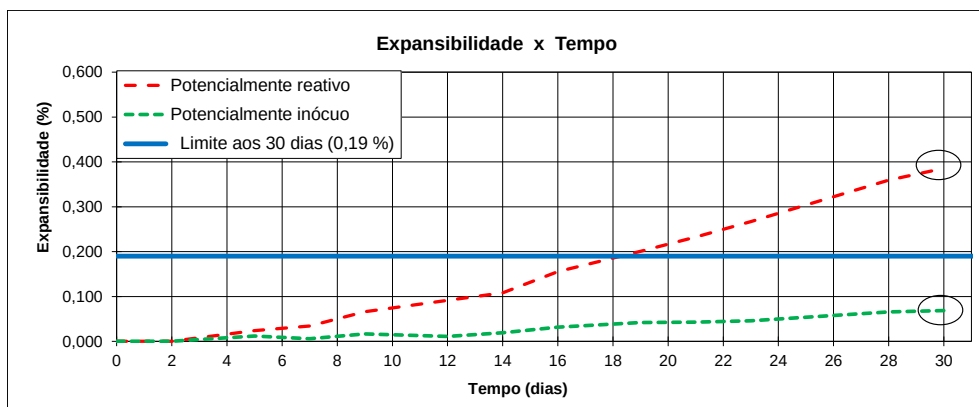


Figura 2– Expansão ao longo de 30 dias – Agregados graúdos (LACTEC, 2019)

2.1.4 Aditivo

Para a manutenção da trabalhabilidade requerida nos traços de concreto em laboratório, utilizou-se um aditivo químico, polifuncional modificador de viscosidade, do fabricante BASF SA, a base de policarboxilato da linha MasterPolyheed. A caracterização do aditivo químico seguiu as diretrizes da NBR 10908 (ABNT, 2008), obtendo-se pH de 5,41, teor de sólidos de 43,97% e densidade de 1,187 g/cm³ (FURNAS, 2019).

2.2 Produção dos concretos

Para a definição das características dos traços utilizados nesta pesquisa, como consumo de cimento por metro cúbico (471 kg/m³) e relação água/cimento (0,46), tomou-se como base os trabalhos de Melo (2010) e Schovanz (2019), traços comumente utilizados em

estruturas de usinas hidroelétricas, com característica de aplicação bombeável. Para ambas as misturas, tanto para CPV como para CPIV, foi utilizado teor de argamassa de 59,4%, materiais secos “m” de 3,38, traço unitário de 1:1,6:1,8:0,46, 217 litros de água/m³, abatimento na faixa de 200±20 mm e 0,14% de aditivo em relação à massa de cimento.

2.3 Cura e ambiente de exposição

Foram realizados, nesta pesquisa, dois tipos de cura para os CPs cilíndricos (ensaios mecânicos e ultrassom) e prismáticos (expansão), sendo executados em CPs distintos, para a avaliação dos ataques químicos individuais (RAA e DEF).

O primeiro, identificado como “**cura convencional**”, refere-se à permanência dos CPs após a moldagem em ambiente laboratorial, com temperatura controlada de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa acima de 50%, com a superfície protegida por filme plástico por 24 h. Após esse período, foram inseridos em tanques de cura com água a 38°C, até as idades de controle, para a avaliação da RAA isolada. Nesta condição foi utilizado o agregado potencialmente reativo e ambos os tipos de cimento (CPV e CPIV).

O segundo tipo de cura, identificado como “**cura térmica**”, foi elaborado com base na literatura (KCHAKECH *et al.*, 2016; RASHIDI *et al.*, 2017; DAYARATHNE, 2013 e SCHOVANZ, 2019). Esta cura consistiu inicialmente na manutenção dos CPs em ambiente laboratorial $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e $(UR \geq 50\%)$, com as faces protegidas por plástico filme por 6 h. Sequencialmente, os corpos de prova foram inseridos em uma câmara climática, de envelhecimento artificial (marca ESPEC). A temperatura interna partiu de 23°C a uma taxa de aquecimento de 10°C/h, com umidade controlada de 98%, até o patamar de 85°C; No interior da câmara, ainda dentro dos moldes e com a superfície protegida por plástico filme, permaneceram no patamar controlado de 85°C e 98% de umidade relativa por 12 h; Posteriormente, iniciou-se o seu resfriamento, a uma taxa de 5°C/h, até a temperatura de 38°C. O ciclo térmico completo teve duração de 27,5 h. Por fim, os CPs (cilíndricos e prismáticos) foram imersos em tanques com água à 38°C, até as idades de controle. A cura térmica foi realizada para misturas com agregados potencialmente inócuos, com CPV e CPIV, para a condição de DEF isolada.

Os prismas de concreto, para ambas as condições, após os períodos de cura inicial, foram curados em recipientes hermeticamente fechados, armazenados na posição vertical e mantidos a 38°C, conforme recomendação da NBR 15577-6 (ABNT, 2018), porém, com o ajuste no método, mantendo-os imersos em água ao invés de ambiente úmido, de forma que todos os CPs avaliados nesta pesquisa permaneceram nas mesmas condições de cura.

2.4 Avaliação por ensaio não destrutivo

As avaliações por ensaios não destrutivos (END) realizadas nesta pesquisa, referem-se à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em corpos de prova cilíndricos de concreto, realizadas antes da execução dos ensaios mecânicos, logo após a retirada dos tanques de cura a 38°C e a secagem superficial, seguindo a metodologia da NBR 8802

(ABNT, 2019). Nesta pesquisa, foi utilizado um aparelho de ultrassom (marca Proceq, modelo Pundit PL 200) com transdutores de 54 kHz de frequência. O resultado obtido para cada CP referiu-se à média de três determinações da velocidade de propagação.

2.5 Avaliação das propriedades mecânicas

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão axial foram realizados com base na NBR 5739 (ABNT, 2018); Para a determinação do módulo de elasticidade estático, a NBR 8522 (ABNT, 2017), utilizando para ambas determinações uma máquina universal de ensaios (marca EMIC, modelo DL 100.000), com capacidade máxima de 100 t, devidamente calibrada.

2.6 Análise visual

A análise visual e os registros fotográficos foram realizados com pelo menos um CP de cada condição estudada, em cada marco de controle. Os CPs cilíndricos foram avaliados superficialmente antes dos ensaios mecânicos, para o monitoramento de manifestações visuais, como poros preenchidos, fissuras ou formações em gel. Após a ruptura, a avaliação seguiu a mesma rotina, porém, para a identificação interna das amostras.

2.7 Expansão do concreto

O método adotado consistiu na medida da variação de comprimento de prismas de concreto, por meio de relógios comparadores que permitam leituras com menor divisão de 0,001 mm, conforme procedimentos da NBR 15577-6 (ABNT, 2018). Ressalta-se que todos os CPs foram moldados a partir de uma única produção na betoneira para cada condição em estudo, de modo a garantir a homogeneidade dos compósitos para a moldagem dos CPs cilíndricos e prismáticos.

3 Apresentação e discussão dos resultados

Para facilitar a avaliação dos resultados, foram inseridas considerações e apresentação de resultados contemplando cada tipo de patologia estudada: RAA isolada e DEF isolada. Também, para a apresentação dos gráficos, padronizou-se a seguinte nomenclatura: REF - Combinação entre agregados, aglomerante e tipo de cura considerada como referência em uma avaliação; AGN - Agregado graúdo potencialmente inócuo para RAS; AGR - Agregado graúdo potencialmente reativo para RAS.

3.1 Ultrassom

Na Figura 3 e na Figura 4 se encontram apresentados os resultados dos ensaios de ultrassom, dos CPs de concreto, correspondentes à RAA e DEF isoladas, respectivamente, nas idades de controle e com os cimentos CP IV e CP V ARI, bem como as respectivas referências para ambos cimentos.

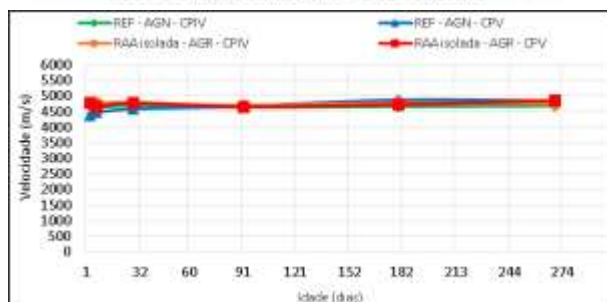


Figura 3 – Ultrassom em CPs de concreto – RAA isolada

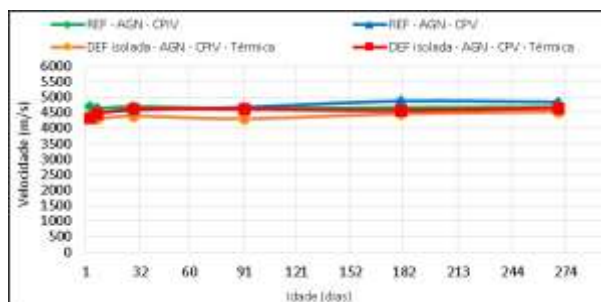


Figura 4 – Ultrassom em CPs de concreto – DEF isolada

Os concretos avaliados, apresentaram resultados similares na velocidade de propagação de onda de ultrassom, independente do procedimento térmico e das diferentes dosagens efetuadas. Também, não foram observadas alterações dos resultados ao longo do tempo e até 9 meses. Seguindo as recomendações da ABNT NBR 8802 (2019), os concretos estariam classificados como de qualidade excelente (> 4500 m/s).

3.2 Resistência à compressão

Na Figura 5 e na Figura 6 estão apresentados os resultados dos ensaios de compressão dos CPs de concreto correspondentes à RAA e DEF, respectivamente. Assim como citado para os resultados de ultrassom, também são apresentadas as referências para ambos cimentos.

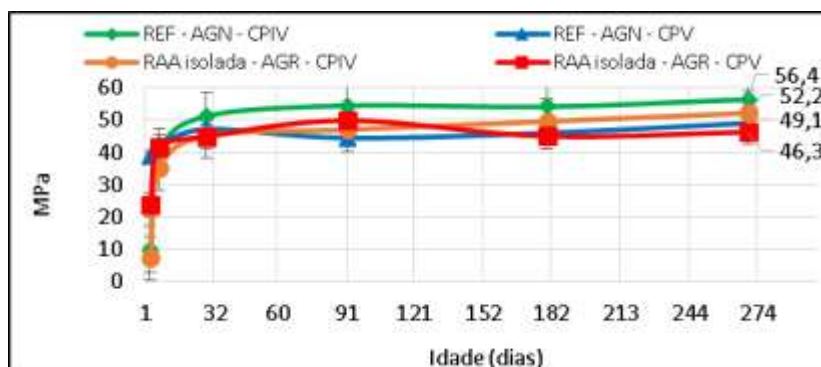


Figura 5– Resultados gráficos do ensaio de compressão – RAA isolada

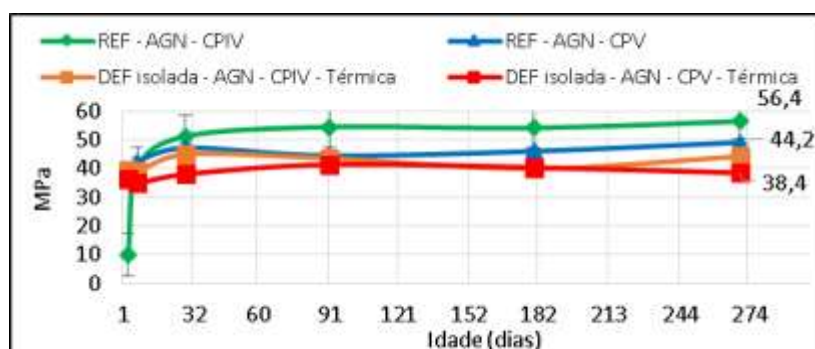


Figura 6– Resultados gráficos do ensaio de compressão – DEF isolada

As condições referência com CPIV e CPV se mantiveram estáveis até os 270 dias, mantendo os resultados constantes, 56 MPa e 41 MPa respectivamente. As combinações com CPIV também se mantiveram constantes. Já para os traços utilizando CPV, é nítida a queda de resistência à compressão, sendo a variação de 91 para 270 dias de 7% para ambas condições. Variações coerentes em confronto com a literatura, tanto para RAA como para DEF. Cita-se que a resistência à compressão é mais sensível em concretos com alto grau de degradação e avançado estágio de fissuração, fatores não observados até os 270 dias (HASPARYK, 2005; SANCHEZ *et al.*, 2018; GIANNINI *et al.*, 2018).

3.3 Módulo de elasticidade estático

Na Figura 7 e na Figura 8 estão apresentados os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático. Para a avaliação comparativa, além das curvas referentes às condições RAA isolada e DEF isolada, utilizando os dois cimentos em estudo, são apresentadas as curvas de referência para cada condição.

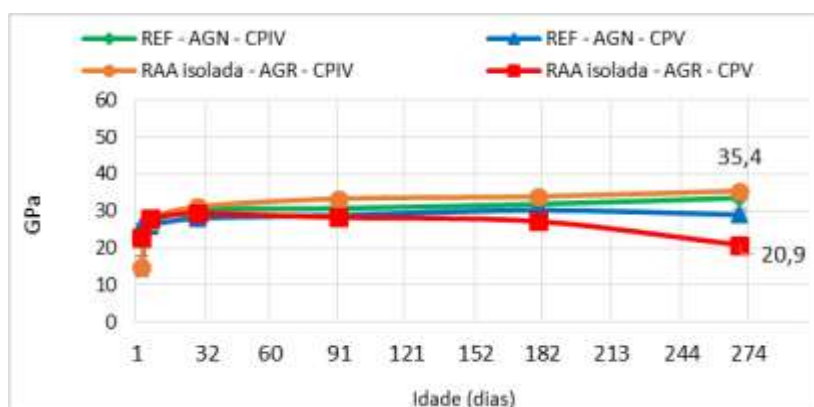


Figura 7– Resultados gráficos do ensaio de módulo – RAA isolada

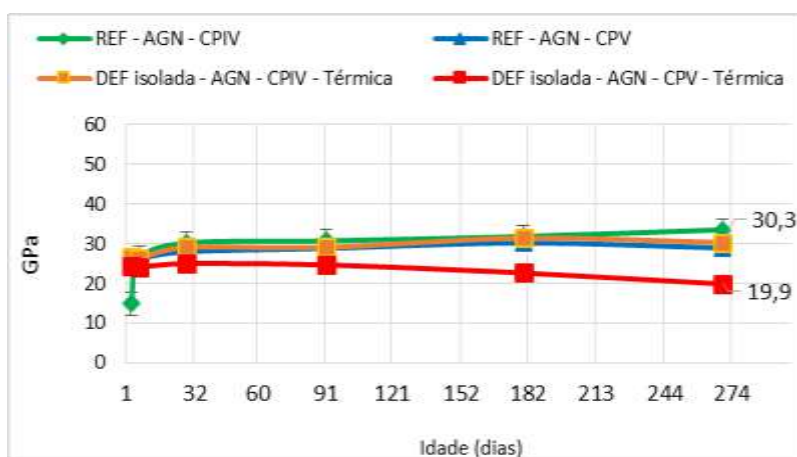


Figura 8– Resultados gráficos do ensaio de módulo – DEF isolada

Para os resultados de módulo de elasticidade estático apresentados para os CPs de concreto, percebe-se que as curvas referentes às condições referência se mantiveram estáveis até os 270 dias, na faixa de 30 GPa. Da mesma maneira se comportaram as

condições utilizando o CPIV (RAA isolada e DEF isolada). Já para as misturas com CPV, observam-se quedas consideráveis para os resultados de módulo. Para RAA isolada, a queda mais significativa foi de 180 até 270 dias, com decréscimo de 7 GPa (23% de redução). Para a condição DEF isolada, a queda iniciou já a partir dos 28 dias, com decréscimo total de 9 GPa (21% de redução). Este comportamento mecânico ao longo do tempo já foi evidenciado por diversos autores aos estudarem reações expansivas, entre eles Diamond (1996), Brunetaud (2005), Hasparyk (2005, 2011) e Shovanz (2019).

3.4 Módulo de elasticidade estático x Compressão

A Figura 9 e a Figura 10 apresentam em gráficos as curvas correlacionando os resultados referentes ao módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão, para as condições RAA isolada e DEF isolada.

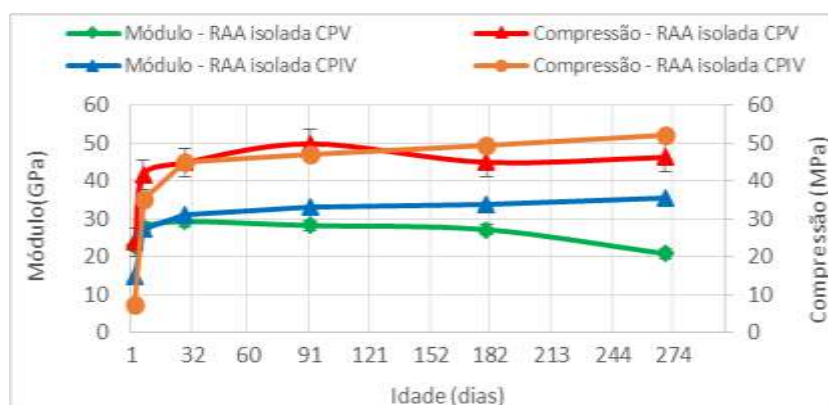


Figura 9– Resultados gráficos da relação entre módulo e compressão – RAA isolada

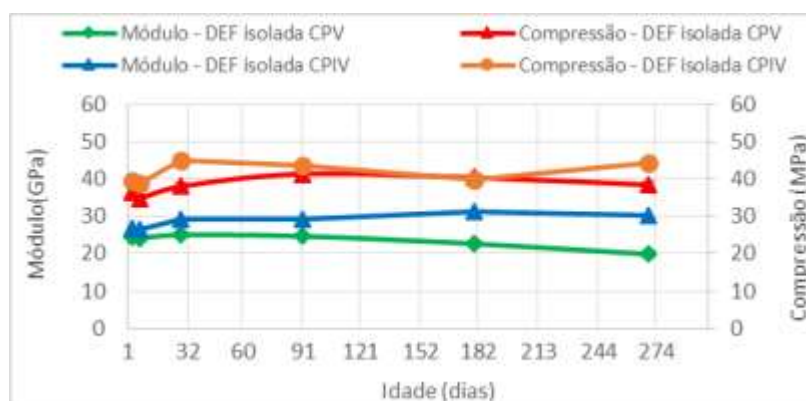


Figura 10– Resultados gráficos da relação entre módulo e compressão – DEF isolada

Este tipo de representação combinada entre as grandezas mecânicas de módulo de elasticidade e resistência à compressão, tem por objetivo possibilitar a análise visual do comportamento ao longo do tempo, principalmente facilitando inferir em qual idade as grandezas continuam com crescimento ou decréscimo devido aos ataques expansivos. Para os concretos estudados, é possível verificar que para ambas as condições, utilizando CPV, as propriedades mecânicas apresentaram queda ao longo do tempo, enquanto para o CPIV, se mantiveram praticamente inalteradas, com tendência ao

crescimento até a idade avaliada. Em relação à DEF, os resultados obtidos vêm de encontro com o exposto por Hobbs (1999), Nguyen *et al.* (2013) e Leklou *et al.* (2016), com reduções das expansões pela adição de material pozzolânico, porém, nos casos citados, em estudos com argamassa. Ramlochan *et al.* (2003) atribui a eficiência para controlar as expansões aos teores de (Al_2O_3) existentes nas adições. Com relação à RAA, são vários os autores que constataram a mitigação, ou pelo menos a postergação das ocorrências expansivas, utilizando cimentos com adição pozzolânica, já sendo consagrado o seu uso (PAULON, 1981; ANDRIOLO, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2014; HASPARYK, 2005; 2011).

3.5 Módulo de elasticidade estático x Dinâmico

A Figura 11 e a Figura 12 representam as correlações entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos.

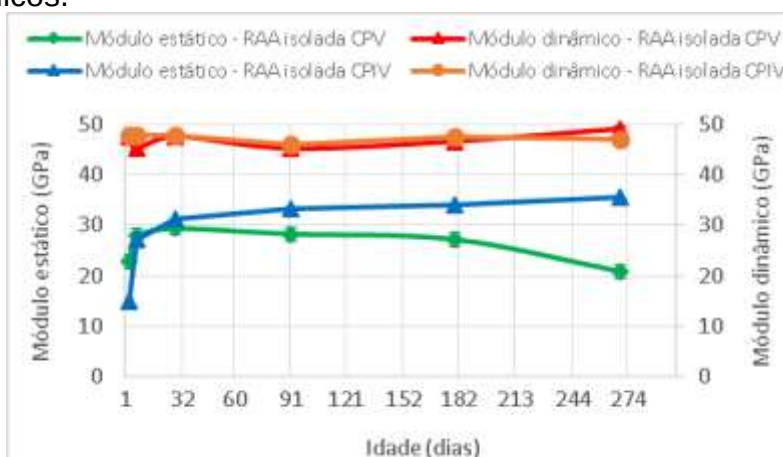


Figura 11– Resultados gráficos da relação entre módulo estático e módulo dinâmico – RAA isolada

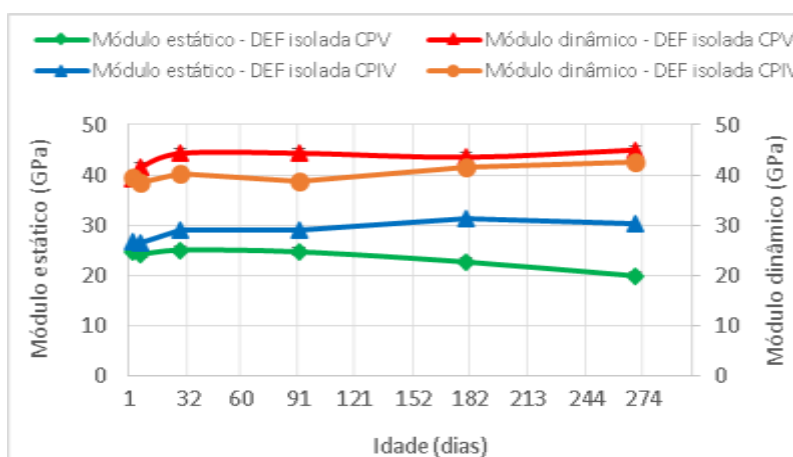


Figura 12– Resultados gráficos da relação entre módulo estático e módulo dinâmico – DEF isolada

Pela análise dos resultados, para ambas as condições, é possível inferir que o método não destrutivo é correlacionável com o método mecânico para a obtenção do módulo de elasticidade estático à compressão (método tangente inicial), sendo possível verificar a diminuição para ambos, principalmente para a DEF isolada. O módulo de elasticidade

estático apresentou valores na faixa de 60 a 70% do módulo dinâmico, podendo ser avaliado como procedimento alternativo para a investigação de elementos de concreto suscetíveis aos ataques expansivos, como já evidenciado por Hasparyk (2005).

3.6 Análise visual

As Figuras de Figura 13 a Figura 16 apresentam as avaliações visuais dos concretos aos 270 dias, para as condições RAA isolada e DEF isolada, utilizando CPIV e CPV.



Figura 13– RAA isolada – CPIV – 270 dias



Figura 14– RAA isolada – CPV – 270 dias



Figura 15– DEF isolada – CPIV – 270 dias



Figura 16– DEF isolada – CPV – 270 dias

Na Figura 13, para a RAA isolada utilizando CPIV, não foi verificada a formação de gel e nem poros preenchidos; já com o CP V, os sintomas já são percebidos, porém ainda quantidade reduzida (Figura 14). Para a condição DEF isolada e o CPIV, foram observados alguns poros esparsos preenchidos por material branco. Porém na Figura 16, já são observados vários poros com a deposição de material na cor branca, dando indícios à presença de produtos neoformados, sugestivos da DEF, e neste caso para a condição DEF e CPV.

3.7 Expansão do concreto

Na Figura 17, são apresentados os resultados de expansão em prismas de concreto para a condição RAA isolada e na Figura 18, para DEF isolada. Em ambos os gráficos, apresentam-se também os resultados para as combinações consideradas como referência no estudo.

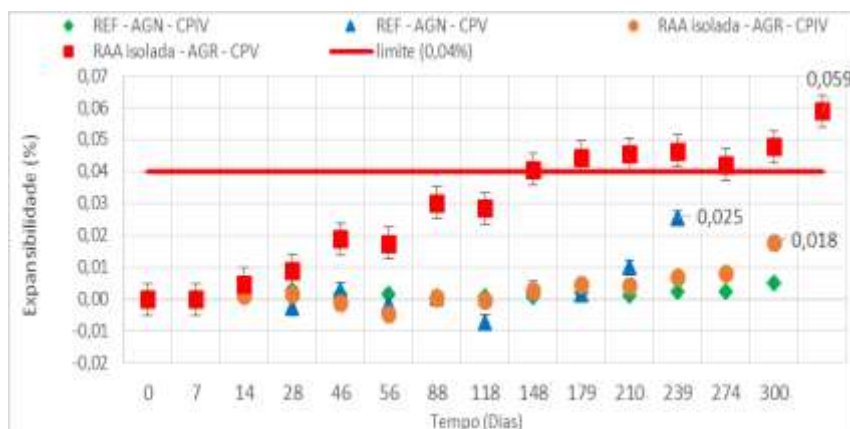


Figura 17– Resultados gráficos do ensaio de expansão – RAA isolada

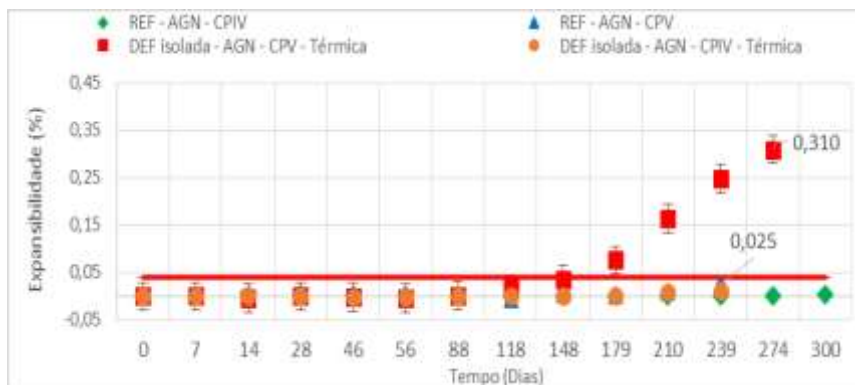


Figura 18– Resultados gráficos do ensaio de expansão – DEF isolada

O gráfico apresentado na Figura 17 (RAA isolada) possui escala no eixo das ordenadas distinta da Figura 18 (DEF isolada), justamente para possibilitar a melhor visualização e análise das condições referência (AGN-CPIV e AGN-CPV), que se repetem na Figura 18. Observa-se que a RAA isolada com CPV apresentou aos 300 dias valor de expansão média de 0,06%, portanto, acima do limite de 0,04% estipulado pela NBR 15577-6 para ANAIS DO 62º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2020 – 62CBC2020

denotar potencial para a RAS (ABNT, 2018). Esse é apenas um limite de referência inicial uma vez que a condição de exposição sofreu algumas alterações do que preconiza a referida norma. Os prismas com o CP IV e agregado reativo mostraram menores expansões, mas com tendência de crescimento ao longo do tempo, sendo de 0,02% na mesma idade avaliada. Chama a atenção a tendência de crescimento para a condição referência com CPV, levando a inferir que agregados classificados como potencialmente inócuos pelo método acelerado (ABNT NBR 15577-4:2018), falso-negativos, podem mostrar comportamentos distintos em ensaios de longa duração (prismas de concreto).

Na Figura 18, pode-se observar que no estudo da DEF isolada, com o CPV, a expansão também superou 0,04% aos 150 dias e, aos 270 dias, a média atingiu valor extremamente elevado, e da ordem de 0,30%. A condição com CP IV e agregado reativo, no estudo da DEF, mostrou comportamento semelhante àquele obtido no estudo da RAA, com menores taxas de expansão.

De forma resumida, na avaliação da RAA isolada, as expansões chegaram a um patamar de 0,06% aos 300 dias, enquanto, nas condições DEF isolada com CPV as expansões foram bem mais expressivas, e da ordem de 0,30% antes dos 300 dias (270 dias). Sabe-se que as reações expansivas por RAA, e envolvendo especificamente a reação do tipo álcali-silicato são, em geral, são mais lentas (ABNT NBR 15577/1, 2018; MEHTA e MONTEIRO, 2014; HASPARYK, 2011). A literatura aponta para fissuração prematura de elementos de concreto atacados por DEF (Bauer *et al.*, 2006), indicando uma maior agressividade quando da presença desse tipo de ataque interno por sulfatos. Esse comportamento foi observado de forma marcante no estudo das expansões apresentado nesse artigo.

4 Considerações Finais

Pelos resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível inferir que a investigação não destrutiva por ultrassom em CPs de concreto não demonstrou, até os 270 dias, variações importantes no resultado da velocidade ultrassônica que pudesse indicar alguma alteração interna em decorrência das condições e patologias testadas. Porém, a partir delas, foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico, e este demonstrou ser correlacionável com o módulo de elasticidade estático. De qualquer forma, as poucas alterações observadas até aproximadamente 9 meses não foram suficientes para usar essa técnica como balizadora das manifestações patológicas testadas. Talvez um grau maior de deterioração seja necessário para que essa técnica passe a notá-las. Ou seja, fica registrado o alerta em relação às faixas preconizadas em norma para considerar a qualidade do concreto por meio desse NDT, quando da presença de reações expansivas. As propriedades mecânicas dos CPs de concreto puderam ser avaliadas pela análise comparativa entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático. Pelos resultados obtidos, até os 270 dias, ocorreram decréscimos tanto nos valores da resistência como do módulo, nas misturas com o CPV. Para as combinações com o CP IV, os resultados se mantiveram estáveis, até a idade de 270 dias. Avaliações em idades posteriores se fazem necessárias de forma a confirmar essa tendência ou não de comportamento.

Em relação às análises visuais, a proporção de poros preenchidos por produtos relacionados às reações químicas é muito mais evidente com o CPV em comparação às condições com o CPIV. Ainda, foram verificadas expansões em prismas de concreto para o CPV em todas as condições avaliadas. De forma resumida, na avaliação da RAA isolada, as expansões chegaram a um patamar de 0,06% aos 300 dias, enquanto, na condição DEF isolada com CPV, as expansões foram bem mais expressivas, e da ordem de 0,30 aos 270 dias. As combinações com CPIV também apresentaram tendências de crescimento, porém menos expressivas. Os estudos devem ser continuados de forma a monitorar os concretos em idades mais avançadas, pois é sabido que as deteriorações em estruturas, derivadas das reações expansivas RAA e DEF, ocorrem depois de muitos anos após sua concretagem.

5 Agradecimentos

Ao laboratório de Estruturas Civas do LACTEC Curitiba/PR, e ao programa de mestrado profissional do mesmo Instituto de Pesquisa, por possibilitar a realização deste trabalho e à FURNAS Centrais Elétricas S.A pela parceria no desenvolvimento de um Projeto de P&D que financiou todos os estudos realizados.

6 Referências

- ANDRIOLO, F. R. **Observações de Estruturas de Concreto: Validade quanto a ocorrência da Reação Álcali-agregado**. Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em estruturas de concreto, Comitê brasileiro de barragens. World Tec Net nº 00005. Tecnologia do concreto, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 30. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de janeiro, 2001.
- _____. NBR NM 46. **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. Rio de janeiro, 2003.
- _____. NBR NM 51. **Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”**. Rio de janeiro, 2001.
- _____. NBR NM 52. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de janeiro, 2009.
- _____. NBR NM 53. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de janeiro, 2009.
- _____. NBR NM 248. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de janeiro, 2003.
- _____. NBR 5739. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de janeiro, 2018.
- _____. NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de janeiro, 2009.
- _____. NBR 7218. **Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de janeiro, 2010.
- _____. NBR 8522. **Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de janeiro, 2017.
- _____. NBR 8802. **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de janeiro, 2019.
- _____. NBR 10908. **Aditivos para argamassa e concreto – Ensaio de caracterização**. Rio de janeiro, 2008.

_____. NBR 15630. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. 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.

_____. NBR 15577-4. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-6. **Agregados – Reatividade álcali-agregado parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 16697. **Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018

BAUER, S. *et al.* **Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation in Concrete: A Literature Review.** CTR Technical Report, Report n. FHWA/TX-06/0-4085-1. Center for Transportation Research, Texas, 2006.

BRUNETAUD, X. **Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton.** Tese de doutorado. Escola central de artes e manufaturas (físico química de materiais), Escola Central de Paris, França, 2005.

DAYARATHNE, W. H. R. S. *et al.* Evaluation of the Potential for Delayed Ettringite Formation in Concrete. **19th ERU symposium, National Engineering Conference 2013, University of Moratuwa, Sri Lanka**, p. 59–66, 2013.

DIAMOND, S. **Delayed Ettringite Formation – Processes and Problems**, In: Cement and Concrete Composites, n.18, p. 205-215, 1996.

GAMBALE, P.G.; GAMBALE, E.A.; HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. **Análises térmicas em blocos de concretos e avaliação da presença de DEF.** In: 61º Congresso Brasileiro de Concreto. Fortaleza-CE, 2019.

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.; DIVET, L. **Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and French prevention strategy.** Tech. Rept. Université Paris-Est, IFSTTAR, 2013.

HASPARYK, N. P. **Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada Do Gel Exsudado.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. p. 326, 2005.

HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. In: ISAIA, GC. **Concreto: ciência e tecnologia**, São Paulo, Brasil: IBRACON. Cap. 27, p.933-1001, 2011.

HASPARYK, N.P.; KUPERMAN, S.C. **Deterioração do concreto por reações expansivas.** In: XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens - SNGB. Salvador-BA, 2019.

HEINZ, D.; KALDE, M.; LUDWING, U.; RUEDIGER, I. **Present state of investigation on damaging late ettringite formation (DLEF) in mortars and concretes.** In: ERLIN, Bernard (editor). **Ettringite: the sometimes host of destruction.** Michigan, USA: American Concrete Institute, p. 199-206, 1999.

HOBBS, D. W. **Expansion and cracking in concrete associated with delayed ettringite formation.** In: Erlin, Bernard (editor). **Ettringite: the sometimes host of destruction.** Michigan, USA: American Concrete Institute, p. 159-182, 1999.

KCHAKECH, B.; MARTIN, R.-P.; OMIKRINE, M.O.; RENAUD, J. C.; BARON, L.; TOUTLEMONDE, F. **Experimental study of the influence of late heat treatment on the risk of expansion associated with delayed ettringite formation.** IFSTTAR, Materials and Structures Department, Boulevard Newton, France, 2016.

LEKLOU, N.; HUONG, V. N.; MOUNANGA, P. **The effect of partial cement substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars.** Korean society of civil engineers. KSCE journal of civil engineering, 2016.

MELO, S.K. de. **Estudo da formação da Etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás. p. 286, 2010.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. HASPARYK, N. P. (Ed.). São Paulo: IBRACON, 2014.

NGUYEN, V.H.; LEKLOU, A.; AUBERT, J.E.; MOUNANGA, P. **The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars.** Construction and Building Materials, v. 48, p. 479-484, 2013.

OLIVEIRA, I. C. de. **Análises de dados para a elaboração de diretrizes, visando à detecção de sulfetos e sulfatos na composição de CCR.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2013. Universidade Federal do Paraná, 2013.

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, p. 114, 1981.

RAMLOCHAN, T; ZACARIAS, P; THOMAS, M. D. A; HOOTON, R.D. **The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortar cured at elevated temperature.** Part I: Expansive behaviour. Cement and Concrete Research, v. 33, p.807-814, 2003.

RASHIDI, M.; PAUL, A.; KIM, J. Y.; JACOBS, L. J.; KURTIS, K. E. **Insights into delayed ettringite formation damage through acoustic nonlinearity.** Cement and Concrete Research, v. 95, p. 1-8, 2017.

SANCHEZ, L. F. M. et al. **Comprehensive damage assessment in concrete affected by different internal swelling reaction (ISR) mechanisms.** Cement and Concrete Research, v. 107, p. 284-303, 2018.

SCHOVANZ, D. **Estudo da formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência.** Dissertação de Mestrado. Faculdade Meridional, Passo Fundo/RS. p. 163, 2019.

SILVA, C. M. da.; **Estudo da potencialidade de compostos a base de silanos no combate da reação álcali-agregado.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília/DF p. 178, 2006.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. **Delayed ettringite formation.** Cement and Concrete Research, v. 31, p. 683-693, 2001.

THOMAS, M.D.A.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.J.; IDEKER, J. H.; RESENDEZ, Y. **The use of lithium to prevent or mitigate Alkali-Silica reaction in concrete.** Pavements and Structures. Transtec Group, Inc. Report No. FHWA-HRT-06-133, 2007.