

## Envelhecimento de estruturas de concreto antigas e modernas - Observações e pesquisas

K. van Breugel\*<sup>1</sup>, T. A. van Beek<sup>1</sup>

\*Autor de Contato: [K.vanBreugel@tudelft.nl](mailto:K.vanBreugel@tudelft.nl)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.174>

Recebido: 18-12-2016 | Aceito: 23-01-2017 | Publicado: 31-01-2017

### RESUMO

Envelhecimento é uma característica inerente da natureza. No entanto, parece ser um tópico bastante novo tanto na ciência quanto na engenharia. A principal razão para aumentar a atenção para o envelhecimento como tema é a consciência crescente de que, particularmente nos países industrializados, o envelhecimento de nossos bens é um fardo financeiro para a sociedade e afeta a sustentabilidade global do nosso planeta. Nesta contribuição, são abordados a urgência e os desafios do envelhecimento das estruturas de concreto. A complexidade dos problemas de envelhecimento será ilustrada por uma análise mais detalhada da evolução da concepção da mistura de concreto e suas consequências para o desempenho em longo prazo das estruturas de concreto. A ênfase será no envelhecimento da infraestrutura de concreto e na justificativa da investigação sobre fenômenos de envelhecimento.

**Palavras-chave:** infraestrutura; sustentabilidade; envelhecimento; estudo de dosagem; retração autógena; normas.

**Citado como:** K. van Breugel, T. A. van Beek (2017). “Envelhecimento de estruturas de concreto antigas e modernas - Observações e pesquisas”, Revista ALCONPAT, 7 (1), pp. 57-72, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i1.174>

<sup>1</sup>Section of Materials and Environment, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands.

### Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação da Associação Latino-americana Controle de Qualidade, Recuperação Patologia e Construção, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos ao No. 04-2013-011717330300-203 uso exclusivo, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional do Direito de Autor. Responsável pela atualização mais recente deste número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e imagens publicadas sem autorização prévia do ALCONPAT Internacional A.C é proibida. Qualquer discussão, incluindo a réplica dos autores, serão publicados na terceira edição do 2017, desde que a informação é recebida antes do encerramento da segunda edição de 2017.

## Ageing of old and modern concrete structures – Observations and research

### ABSTRACT

Ageing is an inherent feature of nature. Yet it seems to be a rather new topic in both science and engineering. The main reason for increasing attention for ageing as a topic is the growing awareness that, particularly in industrialized countries, ageing of our assets is a financial burden for the society and affects the overall sustainability of our planet. In this contribution, the urgency and challenges of ageing of concrete structures are addressed. The complexity of ageing problems will be illustrated by looking in more detail to the evolution in concrete mix design and the consequences thereof for the long-term performance of concrete structures. Emphasis will be on ageing of concrete infrastructure and justification of research on ageing phenomena.

**Keywords:** infrastructure; sustainability; ageing; mix design; autogenous shrinkage; codes.

### Envejecimiento de antiguas y modernas estructuras de concreto - Observaciones e investigaciones

### RESUMEN

El envejecimiento es una característica inherente de la naturaleza. Sin embargo, parece ser un tema bastante nuevo en la ciencia y la ingeniería. La principal razón para aumentar la atención por el envejecimiento como tema es la creciente conciencia de que, en particular en los países industrializados, el envejecimiento de nuestros activos es una carga financiera para la sociedad y afecta la sostenibilidad global de nuestro planeta. En esta contribución se abordan la urgencia y los desafíos del envejecimiento de las estructuras de concreto. La complejidad de los problemas de envejecimiento se ilustra examinando con más detalle la evolución del diseño de la mezcla de concreto y sus consecuencias para el rendimiento a largo plazo de las estructuras de concreto. Se hace hincapié en el envejecimiento de las infraestructuras de concreto y en la justificación de la investigación sobre fenómenos de envejecimiento.

**Palabras clave:** infraestructura; sostenibilidad; envejecimiento; mezcla de diseño; contracción autógena; códigos.

## 1. INTRODUÇÃO

O envelhecimento está em toda parte ao nosso redor. As enormes montanhas parecem manter sua forma para sempre. Mas, de perto, vemos que a superfície das pedras muda gradualmente. Mudanças nas condições de temperatura e umidade, desgaste, vento e luz são suficientemente poderosos para desmoronar até mesmo a rocha mais forte. Idade das montanhas! Terremotos podem dividir montanhas, causando mudanças no estado de tensões nas partes recém-formadas da montanha. As superfícies das fraturas recentes ficam expostas às condições climáticas e começa outro ciclo de envelhecimento.

Como as rochas, as estruturas artificiais também são expostas às condições climáticas do ambiente. Quando expostas a cargas ambientais, as estruturas devem suportar as cargas e o peso próprio de forma segura durante toda a sua vida útil. Estradas e ferrovias precisam de manutenção contínua. Se planejado corretamente, os trabalhos de manutenção minimizam os problemas patológicos e podem mantê-los a um mínimo custo. Se a manutenção chega tarde demais, uma intervenção cara é necessária e pode causar perda de tempo e dinheiro, atrasos ou mesmo acidentes. Os custos diretos da falta de infraestrutura podem ser enormes, mas os custos indiretos geralmente são muitas vezes maiores. O bom funcionamento da nossa infraestrutura é vital para a mobilidade e economia do país. O mesmo se aplica à nossa infraestrutura energética.

As centrais elétricas para a produção de eletricidade e redes de distribuição de energia devem funcionar de forma confiável durante 24 h por dia durante todo o ano. Os componentes que falham podem causar interrupções de processo caras e podem mesmo constituir um risco para a vida e à integridade física. A substituição proativa de componentes vitais de sistemas e estruturas é considerada uma estratégia segura para prevenir falhas catastróficas. Mas nós realmente sabemos o quanto perto estávamos de uma falha catastrófica no momento em que esses componentes foram substituídos? A sociedade estava realmente em risco ou nós estragamos muitos componentes ainda perfeitamente operacionais sem melhorar substancialmente a segurança? Em outras palavras: com qual precisão podemos prever o progresso dos processos de envelhecimento a partir do qual nosso ambiente construído está sofrendo?

O envelhecimento está em toda parte e é inevitável. No entanto, não é fácil encontrar uma definição clara e inequívoca de envelhecimento. O termo envelhecimento é usado para mudanças no desempenho dos materiais com o tempo, estruturas, sistemas, organizações, sociedades, governos, softwares, sistemas econômicos, organismos vivos, etc. Essas mudanças no desempenho podem ser observadas em diferentes escalas. Mas quais são as verdadeiras forças motrizes por trás dessas mudanças? Antes de iniciar uma tentativa de explicar o que entendemos por envelhecimento, primeiro damos uma impressão da relevância social do envelhecimento de nossos ativos fixos, com foco no envelhecimento da nossa infraestrutura.

## 2. ENVELHECIMENTO DA INFRAESTRUTURA E DA SOCIEDADE

Nos países industrializados modernos, a infraestrutura representa mais de 50% da riqueza nacional (Long, 2007). Esta infraestrutura consiste em estradas e sistemas ferroviários, obras hidráulicas, aeroportos, centrais elétricas e redes elétricas. Com base em um inventário em doze países, o valor do estoque de infraestrutura é em torno de 70% do Produto Interno Bruto (PIB) global. Para um PIB global de € 53 trilhões em 2012, isso significa € 37 trilhões.

O crescimento econômico é inconcebível sem o crescimento da infraestrutura de um país. Para acompanhar o crescimento econômico global, o relatório McKinsey (Dobbs et al., 2013) estima um investimento necessário na infraestrutura de € 42 trilhões entre 2013 e 2030. Isto significa um investimento anual de € 2,3 trilhões, o que representa cerca de 4,5% do PIB global. O investimento de € 42 trilhões é necessário para estradas e vias férreas, portos, aeroportos, centrais elétricas, obras hidráulicas e de telecomunicações. O quadro 1 apresenta a divisão dos investimentos nestas categorias. Estes números são (em parte) baseados numa extração a partir de dados fornecidos por 84 países.

Tabela 1. Necessidades estimadas de infraestruturas globais em diferentes categorias. Período 2013-2030 (Dobbs et.al., 2013)

Categoria	Fonte	Investimento necessário [× € 1,000,000,000,000]
Estradas	OECD <sup>1)</sup>	12.2
Ferrovias	OECD	3.3
Portos	OECD	0.5
Aeroportos	OECD	1.4
Energia	IEA <sup>2)</sup>	8.8
Água	GWI <sup>3)</sup>	8.4
Telecomunicações	OECD	6.8
Total		41.4

1) Organisation for Economic Co-operation and Development

2) International Energy Agency

3) Global Water Intelligence

Esses países são responsáveis por 90% do PIB mundial e são considerados a melhor base possível para estimar os investimentos extras necessários para nossa infraestrutura no período de 2013 a 2030.

### 3. ENVELHECIMENTO E CIÊNCIA

#### 3.1 Mudança de desempenho com o tempo

A vida precoce de materiais artesanais, estruturas e sistemas é caracterizada frequentemente por uma probabilidade elevada da falha. É preciso algum tempo para superar problemas iniciais inevitáveis e alcançar o nível necessário de maturidade e estabilidade. Uma vez que esse ponto é atingido, um período de "silêncio" segue até que chegamos novamente em um período de probabilidade crescente de falha. Exceder uma determinada probabilidade predefinida de falha então marca o fim da vida útil de uma estrutura ou sistema. A alta probabilidade de falha no início, o período subsequente de "repouso" e o período subsequente de aumento da probabilidade de falha pode ser apresentado com a curva da "banheira" (Figura 1a).

Em essência, a curva de "banheira" também se aplica aos nossos ativos fixos, mesmo que não tenha sido muito frequentemente utilizada para infraestrutura. A duração do período em que a probabilidade de falha é baixa é de crucial importância para o desempenho econômico desses ativos. A curva da "banheira" sugere que este período é um período durante o qual "nada acontece". É um período de "descanso", ou período "dormente". Assumir que no período de baixa probabilidade de falha nada acontece, no entanto, é enganosa. Se houvesse realmente "descanso", o que poderia então ser a força motriz por trás do aumento da probabilidade de falha com o decorrer do tempo? Para ilustrar o raciocínio anterior, colocar a curva de "banheira" da Figura 1a de cabeça para baixo pode ajudar, como mostrado na Figura 1b. No eixo vertical, agora colocamos 'Desempenho' em vez da 'Probabilidade de falha'. Após um curto período de problemas iniciais, o material, a estrutura ou o sistema atingiram o nível (elevado) de desempenho necessário. Esse é o nível em que o material deve demonstrar sua capacidade de atender aos critérios de segurança e funcionais, se possível sem intervenção para manutenção ou reparo. É o período de "esporte de alto nível" para todos os blocos de construção básicos, ou seja, átomos, moléculas e interfaces, a partir do qual é feito um material ou estrutura. Quando estes blocos de construção básicos desistem e deixam sua posição, o período de deterioração começa. Então o envelhecimento começou! Estes primeiros passos minúsculos de decaimento provavelmente não serão observados na macroescala imediatamente.

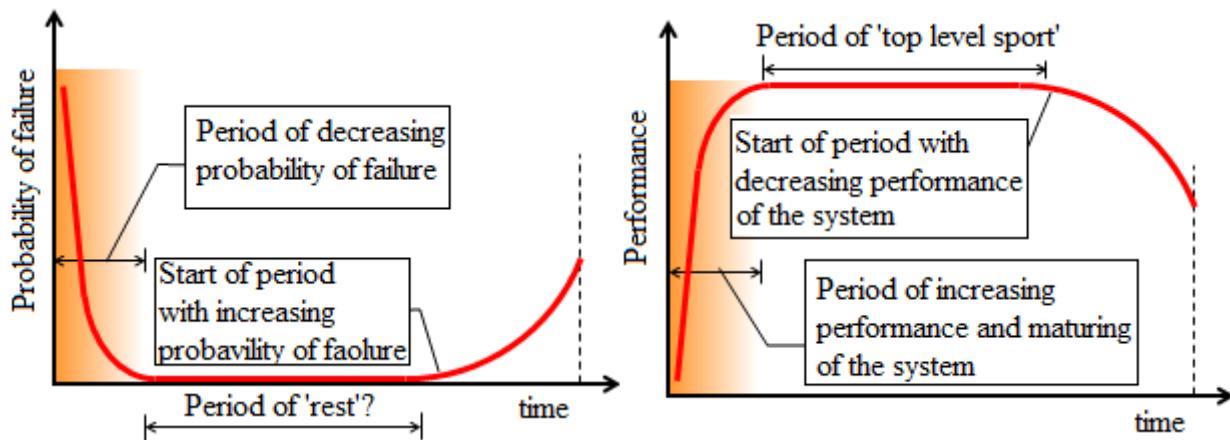


Figura 1. Evolução da probabilidade de falha (curva de banheira) e de desempenho (direita) de sistemas complexos (depois de Van Breugel, 2014)

O momento em que os primeiros blocos de construção básicos cedem só pode ser compreendido com modelos apropriados de comportamento dos materiais como resultado de níveis

subsequentes de observação. Aqui a química, a física, a eletroquímica, a mecânica e a matemática se encontram e precisam uns dos outros para desenvolver ferramentas para descrever e prever processos de envelhecimento a um nível fundamental.

### **3.2 Forças motrizes por trás do envelhecimento - Um olhar mais atento.**

Envelhecimento pode ser definido como uma mudança de desempenho de um material, estrutura ou sistema com o tempo. Como o tempo por si só pode resultar em uma mudança de desempenho, não é fácil de entender à primeira vista. Como um material "em repouso" pode mudar seu desempenho com o tempo? Um olhar mais atento a qualquer parte de matéria "em repouso" nos diz que o status de repouso só se aplica a uma certa escala de comprimento. Indo para a escala atômica o mundo está em movimento o tempo todo! As entidades fundamentais, isto é, blocos de construção básicos, estão se movendo continuamente com uma certa probabilidade de deixar sua posição para aquela que melhor se adapta a elas. Esse fenômeno ocorre no domínio do tempo. É uma característica inerente da matéria e está na base do envelhecimento dos materiais. Em cima desta característica inerente vemos, em diferentes escalas, um número de gradientes, o que pode fazer com que os blocos básicos de construção da matéria para começar a se mover. Gradientes são as forças motrizes causando mudanças no material com o decorrer do tempo. Observe que o limite de qualquer parte de material com seus gradientes de ambiente existe. Estes gradientes dizem respeito, por exemplo, à temperatura, umidade e radiação e podem causar alterações na superfície do material.

O precedente ilustra que um material "em repouso" é dificilmente concebível. Em menores escalas há movimento o tempo todo e uma variedade de gradientes causam os blocos básicos de construção da matéria para mudar sua posição. Em essência, isso vale para todos os materiais e sistemas. Blocos de construção básicos se caminham para uma posição (nível de energia), onde se sentem mais confortáveis. Ao conceber materiais de uma forma inteligente, isto é, minimizando gradientes internos e concentrações de tensões e deformações, haverá uma menor razão para blocos de construção básicos abandonarem a sua posição. Assim, o processo de envelhecimento diminuirá e a vida útil dos materiais, estruturas e sistemas aumentará.

## **4. DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**

### **4.1 Desempenho de tabuleiros de pontes - Um inventário.**

Em março de 2001, os resultados de um estudo muito interessante foram publicados por Mehta (Mehta e Burrows, 2001). Ele analisou o desempenho de tabuleiros de pontes construídos em quatro períodos subsequentes no século XX. O primeiro foi o período anterior a 1930, o segundo entre 1930 e 1950, o terceiro de 1950 a 1980 e o quarto de 1980 até hoje. As misturas de concreto utilizadas para os tabuleiros de pontes foram caracterizadas pela composição química e pela finura do cimento. Os cimentos utilizados no primeiro período, antes de 1930, tinham um teor de C3S inferior a 30% e uma superfície Blaine de 180 m<sup>2</sup>/kg. Consequentemente, a taxa de hidratação foi baixa. O desempenho de muitos dos tabuleiros de pontes feitos com estes cimentos foi muito bom.

Os cimentos utilizados no segundo período foram triturados com uma finura Blaine entre 180 e 300 m<sup>2</sup>/kg. A tecnologia de construção usada para os tabuleiros de pontes foi semelhante à utilizada no primeiro período. Os autores relatam que os tabuleiros de ponte construídos no segundo período foram menos duráveis do que aqueles construídos antes de 1930.

As estruturas construídas entre 1950 e 1980 parecem ter mais problemas de durabilidade do que as construídas antes de 1950. Os cimentos utilizados neste período tiveram uma finura até 400 m<sup>2</sup>/kg e um teor de C3S superior a 60%. Com o objetivo de obter um concreto mais denso e mais durável a razão a/c foi menor do que nos dois primeiros períodos. O maior teor de C3S e a maior finura do cimento aumentaram a resistência inicial destas misturas. Isso tornou possível a

construção mais rápida. Isto, no entanto, resultou em uma maior probabilidade de fissuração térmica agravada por uma maior retração autógena dos traços de relação água-cimento baixa. A maior tendência para a micro fissuração numa idade precoce foi a razão mais plausível para explicar problemas de durabilidade em idades posteriores.

No quarto período, a tendência para atingir resistências mais elevadas continuou. Geralmente, isto foi possível usando traços com uma baixa relação a/c. O uso de traços com baixo teor de a/c aumentou ainda mais o risco de fissuras. Para tabuleiros de pontes, foram encontradas resistências moderadas entre 30 MPa e 45 MPa. Entre 29 tabuleiros de pontes, a fissuração em tabuleiros de pontes de 44 MPa foi duas vezes maior em tabuleiros de pontes de 31 MPa.

#### 4.2 Estudo de traço e propensão ao envelhecimento

O estudo de Mehta sobre o desempenho de tabuleiros de pontes ilustra como a pressão do mercado para construir mais rapidamente criou uma demanda por traços com uma resistência inicial elevada. Isto foi possível usando cimentos mais finos com uma maior quantidade de C3S. O preço disto, entretanto, era uma probabilidade mais elevada de fissuração nas primeiras idades dos tabuleiros da ponte.

Para a elaboração de estruturas mais esbeltas e mais elegantes é necessária uma resistência final mais elevada. As altas resistências são alcançadas pela redução da relação a/c. A utilização de superplasticificantes tornou possível reduzir a relação a/c de dosagens de concretos para valores até mesmo inferiores a 0,2. Com estes traços de baixa a/c, obtém-se concretos densos com baixa permeabilidade. Isso é considerado benéfico para a durabilidade do concreto. Ao mesmo tempo, no entanto, é observado um aumento na tendência do concreto a se micro fissurar, principalmente por causa do aumento da retração autógena.

Outra razão para um maior risco de fissuração de concretos de alta resistência e ultra-alta resistência são as altas temperaturas que ocorrem devido ao alto consumo de cimento. Ao otimizar o empacotamento das partículas das frações de agregados, a quantidade de cimento e, consequentemente, as temperaturas máximas, podem ser reduzidas. Um baixo consumo de cimento também é considerado positivo do ponto de vista da sustentabilidade (menor pegada de carbono da mistura de concreto fresco). Um baixo teor de cimento, no entanto, também tem um inconveniente. Um baixo consumo de cimento reduz a capacidade inerente de autocicatrização do concreto. Do ponto de vista da autocicatrização, um consumo de cimento não muito baixo e o uso de cimento "velho", grosseiramente moído, é favorável. Isto explica em parte o resultado do estudo de Mehta que os tabuleiros de pontes antigas apresentaram um melhor desempenho do que os mais novos. Na terminologia deste artigo, diríamos que as antigas dosagens de concreto com cimentos grosseiros com baixo teor de C3S eram menos propensos ao envelhecimento do que as dosagens modernas com cimentos finamente triturados com alto teor de C3S.

### 5. RETRAÇÃO AUTÓGENA - Um olhar mais atento

Para entender o envelhecimento de misturas de concreto tradicionais e modernas, precisamos de uma imagem clara dos processos que causam tensões internas no material. Conforme discutido na seção 3, essas tensões internas estão entre as forças motrizes do envelhecimento. Uma das causas das tensões internas é a retração autógena do concreto endurecido. Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais da retração autógena de misturas de concreto tradicionais e de alta resistência, bem como medidas tecnológicas para mitigar a retração autógena. A retração autógena medida será comparada com valores dados pelas normas de projetos atualmente utilizadas.

### 5.1 Retração - fatores de influência.

Vários mecanismos têm sido propostos como possíveis causas de retração autógena e/ou fatores contribuintes. Os mecanismos mais comumente relatados são a tensão capilar (na faixa da alta umidade relativa interna), as mudanças nas lamelas hidratadas (com umidade relativa na escala média) e as mudanças da tensão superficial das partículas sólidas de gel. Um parâmetro comum em todos esses mecanismos é a umidade relativa interna. Com o progresso do processo de hidratação a água na mistura é gradualmente consumida e a umidade relativa diminui. Esta assim chamada "secagem interna" acompanha o aumento da pressão capilar na água dos poros e, quando a umidade relativa diminui ainda mais, podem ocorrer destruições localizadas. Consequentemente, o volume da pasta de cimento diminui, o que é conhecido como retração autógena.

A retração da secagem da pasta é restrinida pelas partículas de agregado na mistura. Se a restrição das tensões da retração autógena irá causar microfissuração, depende do tamanho e rigidez das partículas de agregado e das propriedades dependentes do tempo (fluência, relaxamento) do endurecimento da pasta. Como a cura interna de misturas de concreto pode ser usada para prevenir uma queda da umidade relativa e, portanto, da retração autógena, será discutida na próxima seção.

O fato da evolução da retração autógena estar fortemente correlacionada com uma diminuição da umidade relativa interna não significa que a magnitude da retração autógena possa estar diretamente relacionada com a umidade relativa. O tipo de cimento revelou-se também um parâmetro importante (Tazawa e Miyazawa, 1997). Na fase muito precoce da hidratação alguns tipos de cimento mostram expansão. Esta observação é de extrema importância quando se trata da interpretação das medidas de retração. Os pesquisadores devem estar cientes do fato de que, particularmente no estágio inicial do processo de hidratação, as tensões de retração medidas são o resultado líquido de mecanismos de expansão e encolhimento simultâneos. Nesses casos, atribuir tensões de retração medidas em um único mecanismo levará a conclusões completamente erradas sobre os mecanismos subjacentes e, consequentemente, a medidas erradas para prevenir ou mitigar a retração autógena.

A partir desta breve visão geral, aprendemos que uma série de parâmetros afetam a magnitude da retração autógena. Ao manipular estes parâmetros, as consequências da retração autógena podem ser mitigadas e, consequentemente, a susceptibilidade das misturas de concreto ao envelhecimento. Nas próximas seções, a ênfase será na retração autógena e na cura interna do HPC e como a cura interna reduz a retração autógena.

### 5.2 Retração autógena em misturas C55/65 e cura interna.

Conforme indicado na seção anterior, a retração autógena de misturas de baixa relação a/c pode ser reduzida por cura interna. A cura interna pode ser conseguida pela adição de partículas de agregado leve (LWA) saturadas com água ao concreto (Zhutovsky et al., 2001). Quando a RH interna cai, a água armazenada nas partículas de LWA é liberada para a matriz de secagem, mantendo assim a RH a um nível relativamente elevado. Um efeito semelhante pode ser obtido com a adição de polímeros absorventes (SAP), uma tecnologia promovida por Jensen (2013) e tema do comitê RILEM 225-SAP (Mechtcherine e Reinhardt, 2012).

Serão apresentados os resultados dos estudos sobre a retração autógena do concreto e o efeito da cura interna. Os primeiros resultados de ensaios sobre a retração autógena de misturas de concreto C55/65 são discutidos, seguidos dos resultados obtidos com as misturas C28/35 e C35/45.

#### 5.2.1 Antecedentes do estudo.

Nos anos oitenta e noventa do século passado, o uso de concreto de alto desempenho (HPC) com resistência C55/65 foi considerado para várias pontes de concreto na Holanda. A norma de projeto holandesa predominante não exigia que os projetistas considerassem a retração autógena

de tais misturas. No entanto, o proprietário das pontes, o Ministério dos Transportes holandês, exigiu uma verificação do desempenho geral das misturas, incluindo uma verificação da retração autógena e da eficácia da cura interna para mitigar o risco de fissuras nas primeiras idades.

### 5.2.2 Estudo de traço e amostra de teste.

Quatro traços foram testados com a/c variando de 0,34 a 0,39. As composições dos traços são apresentadas na Tabela 2. No traço I, utilizou-se 60 kg de pó de calcário, enquanto a quantidade de cimento foi reduzida pela mesma quantidade. Na mistura IV, 25% do agregado graúdo foi substituído por agregado leve saturado com água, Liapor F10. A retração autógena foi medida em amostras seladas, 100 x 100 x 400 mm<sup>3</sup>.

Tabela 2 Composições de mistura de HPC (C55/65) (Van Breugel et.al., 2000)

Componente	Unit	Traço			
		I	II	III	IV
Água	kg/m <sup>3</sup>	133	153	156	156
CEM III/B 42.5 LH HS	kg/m <sup>3</sup>	248	340	300	300
CEM I 52.5 R	kg/m <sup>3</sup>	112	110	100	100
Calcário em pó <sup>1)</sup>	kg/m <sup>3</sup>	60	--	--	--
Relação água/cimento		0.37	0.34	0.39	0.39
Areia 0 – 4 mm	kg/m <sup>3</sup>	942	860	830	830
Agregado britado 4–16 mm	kg/m <sup>3</sup>	997	980	975	730
Liapor F10, 4-8 mm	kg/m <sup>3</sup>	--	--	--	156
HR Superplast. CON 35	kg/m <sup>3</sup>	5.0	--	--	--
Cretoplast CON 35	kg/m <sup>3</sup>	--	1.8	--	--
Cretoplast SL01 CON 35	kg/m <sup>3</sup>	--	7.2	--	--
Adição BV1	kg/m <sup>3</sup>	--	--	1.6	1.6
Adição FM 951	kg/m <sup>3</sup>	--	--	4.8	4.8

1) Finura 530 m<sup>2</sup>/kg

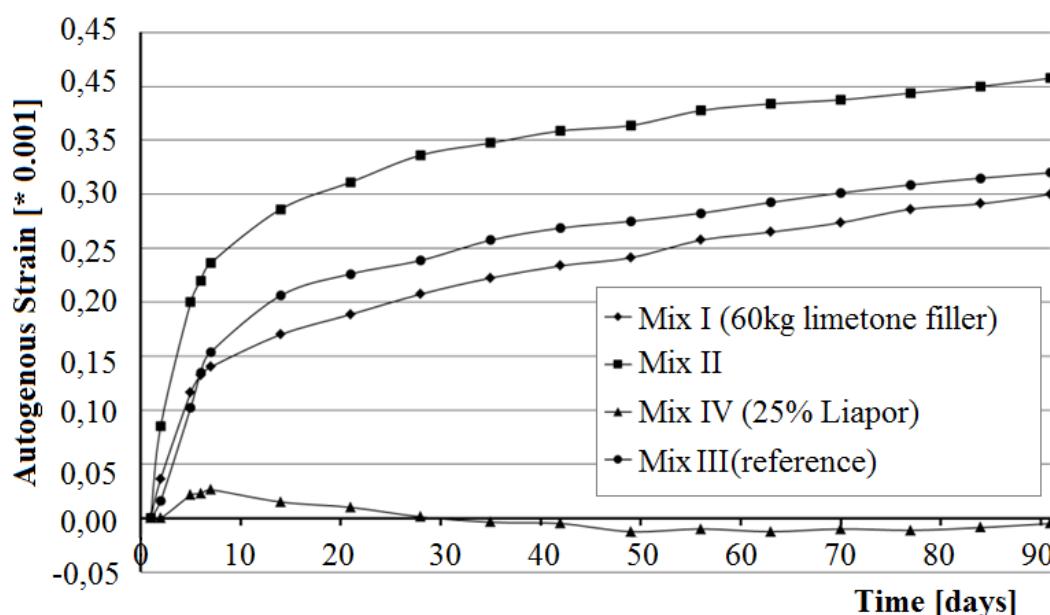


Figura 2. Retração autógena dos traços I a IV. 20°C. Medições iniciadas após 1 dia (Van Breugel et.al., 2000)

### 5.2.3 Medidas de deformação autógena e avaliação.

As retrações autógenas dos traços são apresentadas na Figura 2. As medições começaram após 1 dia. Isto implica que a primeira parte da deformação autógena não foi registrada. Isto não foi considerado um problema, uma vez que o objetivo da série de ensaios era quantificar como a retração autógena afetaria a retração por secagem. Na prática, a retração não começará geralmente durante o primeiro dia após a moldagem. Para o propósito deste estudo foi apropriado, portanto, medir somente a retração autógena após 1 dia.

As curvas de retração dos traços I, II e III mostram que uma maior parte da retração autógena ocorre nos primeiros dias após a mistura. Mas, mesmo após 28 dias, a retração autógena ainda continua. De 28 a 91 dias, a retração autógena das misturas I, II e III varia de 70 a 90  $\mu\text{m}$  m. A substituição de 25% do agregado pesado por partículas de agregado leve saturado com água foi suficiente para eliminar a retração autógena da pasta. Obviamente, a cura interna utilizando partículas de agregado leve saturado (Liapor F10, 4-8 mm) é muito eficaz.

### 5.3 Retração autógena de misturas de concreto tradicionais C28/35 e C35/45.

A elevada retração autógena da mistura C55/65, muito maior do que a esperada, foi motivo suficiente para iniciar uma investigação sobre a retração autógena de misturas de concreto tradicionais com relações a/c entre 0,44 e 0,50, classes de resistência C35/45 e C28/35. Van Cappellen (2009) relatou que, particularmente em idades precoces, a retração autógena de misturas de concreto feitas com cimento de escória de alto forno se desenvolveu mais rápido do que a das misturas de OPC. Aos 200 dias a diferença não era muito grande. O estudo de Van Cappelle foi continuado por Mors (2011) para misturas feitas com dois tipos de agregado, isto é, calcário e quartzo. As composições da mistura são apresentadas na Tabela 3. As Figuras 3 e 4 mostram a retração autógena das misturas tradicionais T (0,50) e T (0,44) feitas com agregado de quartzo e as misturas N (0,50) e N (0,46) feitas com agregado de calcário. As curvas de retração mostram de forma convincente que as misturas com a/c na faixa de 0,44 a 0,5 também apresentam substancial retração autógena. Mais importante ainda, estas misturas também exibem retração autógena em idades acima de 28 dias, a idade em que o concreto é geralmente assumido que já atingiu um elevado grau de maturidade!

Tabela 3. Composições dos traços de concreto C28/35 e C35/45 (Mors, 2011)

Concreto	T (0.50)	T (0.44)	N (0.50)	N (0.46)
Classe de resistência	C28/35	C35/45	C28/35	C35/45
CEM III/B ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	340	340	340	360
LSP filler ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	--	--	20	20
a/c de projeto	0.50	0.44	0.50	0.46
SPL (% $\text{M}/\text{M}_{\text{cem}}$ )	0.2	0.2	0.2	0.2
Agregado fino	Sand 0/4	Sand 0/4	Sand 0/4	Sand 0/4
Agregado graúdo	Gravel	Gravel	Limestone	Limestone
Proporções	4/8, 8/16	4/8, 8/16	6/20	6/20

T = Mistura tradicional (agregado de quartzo); N = As misturas feitas com calcário natural como agregado

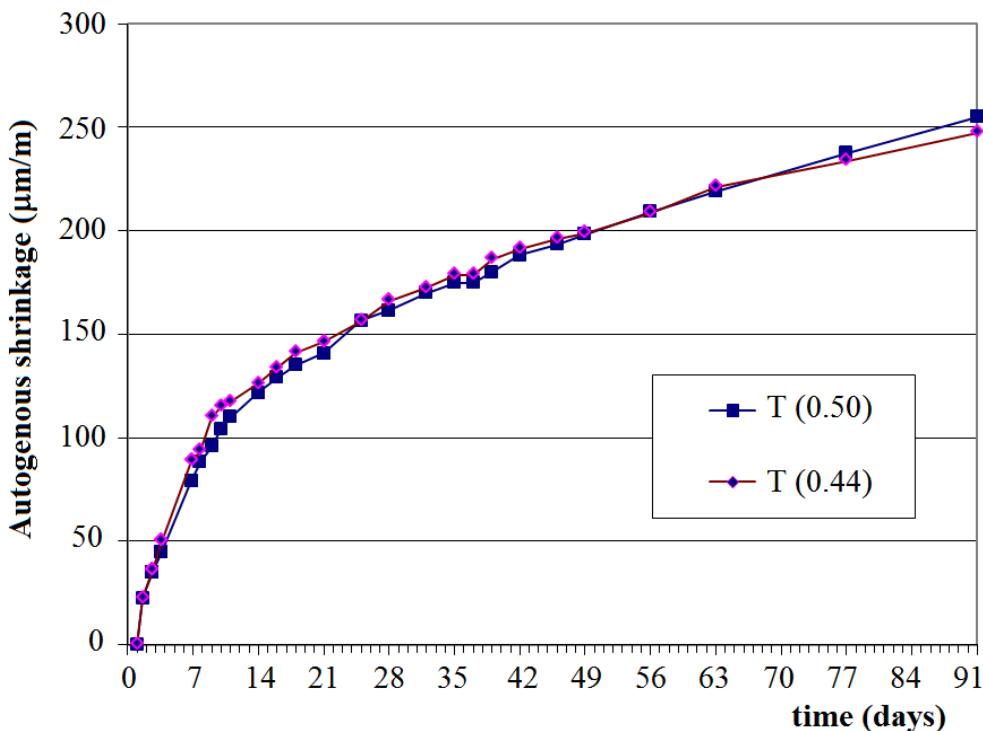


Figura 3. Retração autógena de misturas tradicionais T(0.50) e T(0.44). Agregado de quartzo. a/c = 0.5 e 0.44 (Mors, 2011; Van Breugel et.al., 2013)

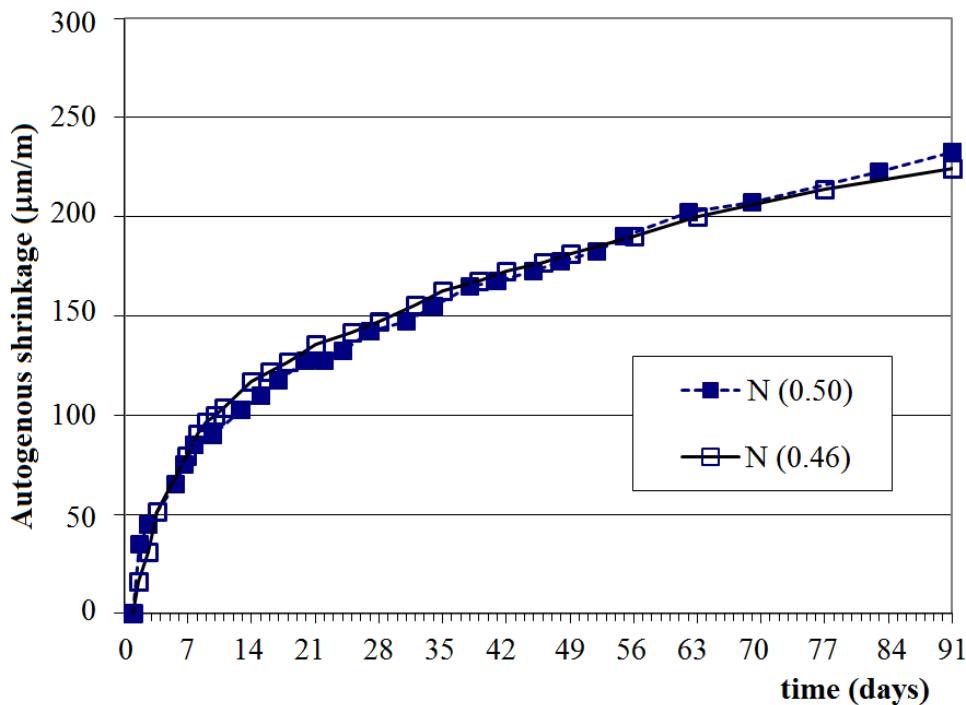


Figura 4. Redução autógena de misturas N(0.50) e N(0.46). Agregado calcário. a/c = 0.46 e 0.50 (após Mors, 2011; Van Breugel et.al., 2013)

#### 5.4 Retração autógena, retração por secagem e normas de projeto.

No passado, estudos experimentais sobre a retração por secagem de concreto foram frequentemente realizados em amostras com 28 dias de idade e as curvas de contração medidas foram em grande parte interpretadas como retração por secagem. A partir das curvas de retração autógena apresentadas nas seções anteriores, temos que concluir, entretanto, que após 28 dias não

é possível ignorar a retração autógena, inclusive para misturas com relações água-cimento maiores que 0,4. Para estas misturas, a contribuição da retração autógena para as curvas de contração medidas em amostras secas tem sido frequentemente negligenciada. Isto significa que no passado muitos ensaios de retração de secagem podem ter sido mal interpretados. Uma parte substancial das curvas medidas em amostras secas deveria ter sido atribuída à retração autógena. Em atualizações recentes das normas de projeto, a retração autógena está agora explicitamente mencionada, também para misturas tradicionais com  $a/c > 0,4$ . No novo EuroCode 2 e na norma japonesa, a retração autógena é considerada também para misturas com classes de resistência <C55/65.

Para traços com  $a/c$  0,44 - 0,50, no entanto, estas normas ainda subestimam a retração autógena, pelo menos para os traços ensaiados e os tipos de cimento considerados nas seções anteriores. A Figura 5 mostra a retração autógena de acordo com o EuroCode 2 e a norma JSCE, juntamente com a retração autógena medida em concretos de resistência normal C28/35 (T (0,50)). São apresentadas tanto a retração autógena medida como a curva após correção para a pequena perda de umidade através do selante. A retração autógena de acordo com o EuroCode 2 é apresentado para os traços C28/35 e C35/45, ou seja, misturas com resistências semelhantes à resistência medida das misturas consideradas neste documento. Em ambos os casos, a retração autógena de acordo com o EuroCode 2 é cerca de 30% da retração autógena medida. A subestimação da retração autógena pelo EuroCode 2 também foi observada por Darquennes et al. (2012). As previsões com a norma japonesa estão mais próximas dos valores medidos, mas ainda subestimam a retração autógena medida.

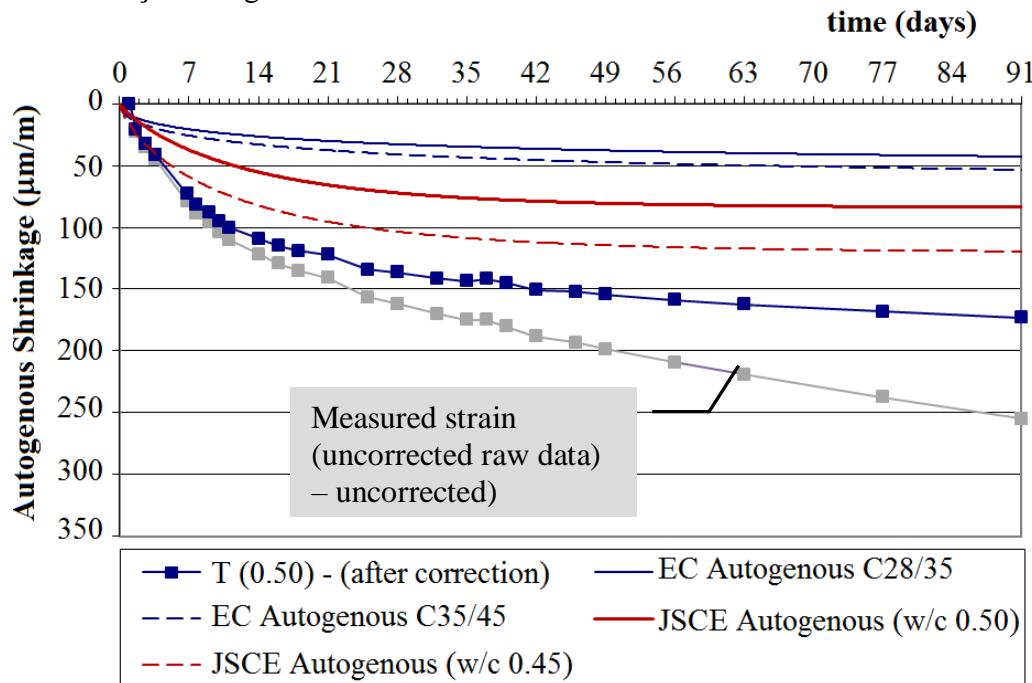


Figura 5. Comparação da retração autógena medida com previsões do EuroCode 2 e a norma Japonesa

### 5.5 Retração e Envelhecimento.

A retração autógena e de secagem acompanham a evolução das tensões internas. Em ambos os casos, a pasta de cimento é o componente que retrai. Todas as tensões induzidas pela retração estão sujeitas a relaxamento. O relaxamento das tensões, no entanto, não é "de graça". Ela requer a reestruturação de pequenos blocos de construção de matéria. Em outras palavras: a idade material! No que diz respeito às curvas de contração autógena, tem sido proposto que as deformações de longo prazo observadas possam ser curvas de fluência seguindo as curvas de

retração elásticas exercidas pelas forças capilares na água dos poros. Além disso, essas deformações de fluência não são "de graça", mas requerem reestruturação dos elementos elementares do material: O material envelhece! Para análise quantitativa da fluência e do relaxamento, Wittmann (1977) aplicou o conceito de energia de ativação, considerado a abordagem mais apropriada para a pesquisa fundamental de fenômenos de envelhecimento de materiais baseados em cimento.

## 6. ENFRENTAR O ENVELHECIMENTO

### 6.1 Design de materiais.

O envelhecimento é uma característica inerente aos materiais. Soluções para problemas de envelhecimento exigem, portanto, intervenções ao nível dos materiais fundamentais. Para lidar com problemas de envelhecimento, são concebíveis duas abordagens, isto é, a abordagem preventiva e a abordagem reativa.

Na abordagem preventiva, o foco está no projeto de materiais homogêneos com o menor número possível de gradientes internos, concentrações de tensões e interfaces. Para materiais heterogêneos, como o concreto, este é um grande desafio. Ao passar pelas escalas de comprimento subsequentes, do nível (sub) nano ao meso, o concreto se comporta como um sistema complexo. Dito de outra forma, o concreto é um "produto da mente" (McCarter, 2009), cujas propriedades são determinadas pelas propriedades dos componentes individuais e das interfaces entre eles. Alguns destes componentes - na verdade todos! - mudam com o tempo, e assim fazem as propriedades das interfaces. Isso torna os materiais heterogêneos suscetíveis ao envelhecimento.

Na abordagem reativa, a heterogeneidade do material e, portanto, as concentrações internas de tensões e deformações e a ocorrência de danos internos e envelhecimento, são consideradas uma questão de fato. Se o envelhecimento é, na verdade, inevitável, a autocicatrização poderia ser uma solução para problemas de envelhecimento. Quando se trata de concreto, a presença de partículas de cimento ainda não hidratadas proporciona uma capacidade inerente de autocicatrização. A este respeito, o concreto feito com um cimento grosso é considerado favorável ao concreto feito com um cimento fino. A observação de Mehta (2001) de que os tabuleiros de pontes antigas, construídas com cimento grosso, apresentaram melhor desempenho do que as construídas com cimentos mais finos, poderiam ser explicadas, pelo menos em parte, pelo papel de autocicatrização nas estruturas mais antigas. A tendência moderna para, em primeiro lugar, usar cimento mais fino para acelerar a taxa de ganho de resistência e, em segundo lugar, reduzir a quantidade de cimento para reduzir a pegada de CO<sub>2</sub> do concreto, pode trabalhar negativamente sobre a resistência do material contra o envelhecimento! Nestes casos, uma análise abrangente do ciclo de vida é necessária para pesar todos os prós e contras das tendências modernas na concepção do traço de concreto.

### 6.2 Envelhecimento e normas de projeto.

Para a concepção e realização de estruturas de concreto, as normas de projeto são indispensáveis. Dos numerosos edifícios e obras de construção fascinantes realizadas no passado, um alto grau de maturidade destas normas pode ser inferido. Na seção 5.4, vimos, contudo, que as normas prescritivas correntemente utilizadas falham em descrever o desempenho a longo prazo, isto é, a contração de estruturas de concreto. Nesse sentido, é interessante refletir sobre a tendência recente de mudar de normas prescritivas para normas baseadas em desempenho. A questão é saber se é de esperar que, com esta mudança, as questões do envelhecimento sejam consideradas de forma mais adequada e passem a fazer parte de uma abordagem de projeto integral para as estruturas de concreto. Estritamente falando, a mudança de normas prescritivas para normas baseadas em desempenho é um retorno à origem da profissão de construtor. Antigamente, todo o

processo de construção estava nas mãos de uma pessoa: o construtor. O construtor tinha a responsabilidade integral de cumprir todos os critérios de segurança e funcionais estabelecidos pelo proprietário.

Como o construtor conseguiu cumprir os critérios do proprietário, não foi prescrito em detalhes. Tudo isso foi considerada a competência e a responsabilidade do construtor. Em seu livro clássico sobre tecnologia de construção, Vitrúvio (85-20 a.C.) afirmou que preferivelmente todo o processo de construção deveria estar nas mãos de uma pessoa. Quando Vitrúvio escreveu seu livro, alguns anos a.C., percebeu já que essa situação ideal já não era sustentável. O processo de construção se tornou muito complicado e uma única pessoa não poderia ser um especialista em todas as áreas do processo de construção. Gradualmente, o construtor teve que compartilhar sua responsabilidade com os outros. Esta situação começou a surgir de certificados e, mais tarde, normas prescritivas. O usuário destes documentos poderá ser responsabilizado pela correta interpretação e cumprimento das normas, mas não pelo conteúdo das normas.

As normas prescritivas podem ser julgadas como a consequência final de um processo de crescente fragmentação do processo de construção e, mais importante, da visão de que tudo, incluindo a qualidade, é engenheirável. Os enormes problemas de sustentabilidade que enfrentamos hoje, no entanto, ilustram que essa visão perdeu a maior parte de seu poder convincente. Normas prescritivas, mesmo as mais detalhadas, são necessárias, mas insuficientes para garantir qualidade e/ou sustentabilidade. Normas prescritivas lidam com propriedades de materiais com o objetivo principal de fornecer ao projetista os dados necessários para projetar estruturas seguras. Qualquer alteração de desempenho dos materiais com o tempo é considerada uma propriedade dependente do tempo sem abordar a causa dessas alterações.

Com normas baseadas no desempenho, o processo de construção foi devolvido ao construtor, incluindo o desafio de realizar (a longo prazo) critérios de qualidade e metas de sustentabilidade. A liberdade do construtor de decidir como atender a esses critérios e objetivos pode estimular o construtor a investir em pesquisa fundamental de materiais de construção tradicionais e novos e em conceitos de projeto inovadores. Além disso, as normas baseadas no desempenho, em combinação com os novos contratos DBFM (Design-Built-Finance-Maintenance), também forçarão o construtor a focar tanto o desempenho a curto quanto a longo prazo, isto é, o envelhecimento de materiais e estruturas. Para isso, o construtor necessitará de modelos preditivos confiáveis, incluindo modelos para quantificar a taxa de processos de envelhecimento e suas consequências.

## 7. INVESTIMENTO NECESSÁRIO PARA GERAR ECONOMIAS

Na seção 2, foi explicado que o envelhecimento dos bens de capital fixo, ou seja, o ambiente construído da nação é um enorme fardo financeiro para a sociedade. Uma maneira de reduzir esse fardo é reduzindo os custos de manutenção e estendendo o tempo de vida de nossa infraestrutura. Isso resultará em economias nos custos anuais de reposição de estruturas obsoletas. Mas para realizar estas economias nós devemos primeiramente investir! Potenciais poupanças justificam e exigem investimentos na pesquisa do envelhecimento. Alguns números-chave podem ajudar a obter uma imagem indicativa do investimento necessário para realizar um certo nível de poupança. Na seção 2, o valor global do estoque de infraestruturas foi estimado em 37 trilhões de euros. Vamos supor uma vida útil média destes ativos de infraestrutura de 50 anos. A cada ano, 740 bilhões de euros deverão então ser gastos na substituição de ativos obsoletos.

Suponhamos ainda que, através de pesquisas específicas, a vida útil média possa ser aumentada em 10%, ou seja, de 50 a 55 anos. Os custos anuais de substituição diminuiriam de 740 para 670 bilhões de euros. Trata-se de uma redução de 70 bilhões de euros por ano. Suponhamos que, para economizar estes 70 bilhões de euros, devamos investir 20% deste montante em investigação, ou seja, 14 bilhões de euros por ano. Suponhamos ainda que 50% dos recursos necessários à

investigação, ou seja, 7 bilhões de euros, devem ser gastos na investigação orientada para a gestão e os outros 50% na investigação científica sobre materiais e estruturas. Uma parte desta pesquisa orientada para a ciência deve ser dedicada à pesquisa do envelhecimento. Um pressuposto razoável, embora conservador, é que 10% da investigação orientada para a ciência, ou seja, 0,7 bilhões de euros por ano deve ser gasto na investigação fundamental do envelhecimento. Estes 0,7 bilhões de euros representam apenas 1% das poupanças visadas. Esquematicamente, isto é mostrado na figura 6. Ao variar as hipóteses neste exercício, são obtidos outros valores para os investimentos necessários, mas não alteram a ordem de grandeza destes valores.

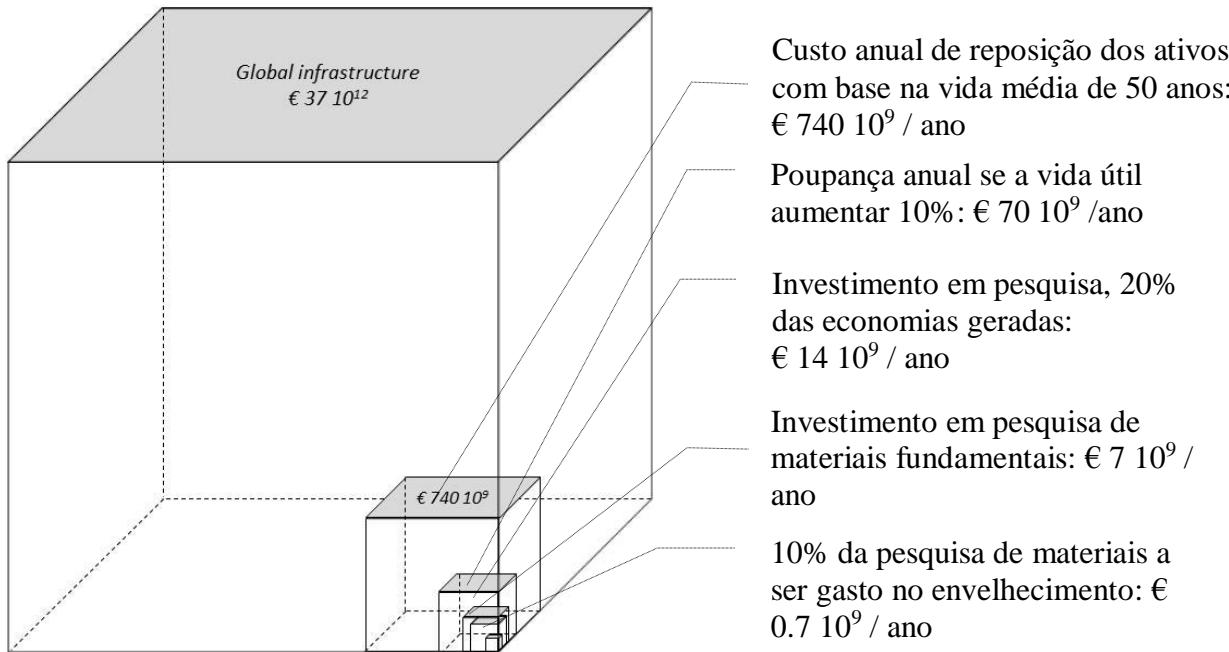


Figura 6. Apresentação esquemática do investimento necessário em pesquisa de envelhecimento para realização de uma extensão da vida média de serviço de 10%. (Juros / inflação não considerados). Vida útil estimada 50 anos.

## 8. OBSERVAÇÕES FINAIS

A infraestrutura de uma nação perfaz aproximadamente 50% de sua riqueza nacional. Esta enorme parcela de nossa riqueza nacional, no entanto, está envelhecendo! Com a existência, o crescimento, a manutenção e a substituição do envelhecimento da infraestrutura, uma enorme responsabilidade chega a todos os atores envolvidos no planejamento, projeto, construção e operação de nossos ativos. É uma questão de mordomia responsável para mitigar o impacto ambiental que vem junto com a realização e operação de nossa infraestrutura.

A investigação fundamental sobre o envelhecimento é recomendada para melhorar as ferramentas para previsões precisas e confiáveis do desempenho a longo prazo da nossa infraestrutura de envelhecimento. Os resultados de pesquisas experimentais sobre a retração autógena de materiais inovadores baseados em cimento, tradicionais e modernos, ilustram a necessidade de mais pesquisas para entender melhor a causa da retração autógena, bem como as possibilidades (algumas vezes inesperadas) de mitigar a retração autógena, por exemplo, usando resíduos de baixa tecnologia, como cinzas de casca de arroz (Tuan, 2011). A redução da retração implica mitigar as tensões induzidas por retração e, portanto, reduzir a taxa de envelhecimento.

As normas de projeto baseadas no desempenho, em combinação com novos contratos em que o construtor é responsável pelo desempenho a longo prazo e funcionamento das suas estruturas,

geram uma forte necessidade de conhecimento dos fenómenos de envelhecimento nos materiais e estruturas. Desta forma, as normas baseadas no desempenho podem estimular a busca por soluções inovadoras.

Como muitas outras indústrias, a indústria da construção também está sob pressão. As estruturas devem ser feitas mais rapidamente, mas com menor impacto ambiental. Qualquer produto, no entanto, realizado sob pressão, independentemente do tipo de pressão, tem uma tendência inerente ao envelhecimento com a idade. Para lidar com o risco de aumentar as taxas de envelhecimento, é necessário um conhecimento aprofundado do desempenho de materiais e estruturas com o decorrer do tempo.

Um aumento da vida útil média de nossa infraestrutura em 10% economizaria dezenas de bilhões de euros a cada ano. Os investimentos necessários para realizar estas economias são estimados em 20% dessas economias. Presume-se que metade deste montante é necessária para a investigação de materiais e estruturas, dos quais 10% foram considerados necessários para a investigação fundamental sobre o envelhecimento. Estabelecer objetivos de poupança não é apenas um desafio e um estímulo para a investigação e inovação. Os números também ilustram que cuidar de nossa infraestrutura vai finalmente ter êxito.

## 9. AGRADECIMENTOS

Parte deste trabalho foi baseado no Documento de Visão do Centro de Envelhecimento para Materiais, Estruturas e Sistemas da Universidade Técnica de Delft. Agradecemos especialmente ao Centro de Envelhecimento ter disponibilizado este importante documento como material de suporte para este artigo.

## 10. REFERENCIAS

- Darquennes, A., Roziere, E., Khokhar, M. I. A., Turcry, Ph., Loukili, A., Grondin, F. (2012) *“Long-term deformation and cracking risk of concrete with high content of mineral additions”*. Materials and Structures, Vol. 45, No. 11, pp 1705-1716.
- Dobbs R., et al. (2013) *“Infrastructure productivity: how to save \$ 1 trillion a year”*. McKinsey Global Institute, p. 88
- EuroCode 2. (2004) *“Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”* (Ref. No. EN 1992-1-1:2004: E)
- Jensen, O. M. (2013) *“Use of superabsorbent polymers in concrete. Concrete international”*, Vol. 35, No.1, pp. 48-52.
- JSCE (1996, 2002), *“Standard specification for design and construction of concrete structures, part I [Construction]”* (in Japanese), JSCE, Tokyo, Japan.
- Long, A.E. (2007) *“Sustainable bridges through innovative advances”*. Institution of Civil Engineers, presented at Joint ICE and TRF Fellows Lecture. 23.
- McCarter, R. (2009) *“Louis I. Kahn and the nature of concrete”*. Concrete International, Vol. 31, Nr. 12, pp. 27-33.
- Mechtcherine, V., Reinhardt, H. W. (2012) *“Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in concrete construction”*. STAR Prepared by Technical Committee 225-SAP, p. 165.
- Mehta, P. K., Burrows, R.W. (2001) *“Building durable structures in the 21st century”*. Indian Concrete Journal, pp. 437-443.
- Mors, R. M. (2011) *“Autogenous shrinkage – cementitious materials containing BFS”*. MSc-thesis, TU Delft, p. 63.
- Tazawa, E., Miyazawa, S. (1997) *“Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials”*. Magazine of Concrete Research, 49, 178, pp. 15-22

- Van Breugel, K., Ouwerkerk, H., de Vries, J. (2000) “*Effect of mixture composition and size effect on shrinkage of high strength concrete*”. Proc. Int. RILEM Workshop Shrinkage of Concrete - Shrinkage 2000. Ed. Baroghel Bony et al., Paris, pp. 161-177.
- Van Breugel, K. (2013) “*A critical appraisal of codes as vehicles for realizing on-site quality*”. Proc. fib. Symposium Engineering the concrete future: Technology, Modelling and Construction. Mumbai.
- Van Breugel, K., Mors, R. E., Bouwmeester, J. (2013) “*New insight in the combination of autogenous and drying shrinkage*”. Fib symposium Engineering the concrete future: Technology, Modelling and Construction.
- Van Breugel, K. (2014) “*Caring for ageing infrastructure – Scope, strategy and responsible stewardship*”. Proc. 3rd. Int. Conf. on Service Life Design for Infrastructures. Zhuhai.
- Van Cappellen, J. (2009) “*Autogenous and drying shrinkage*”, MSc-thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. 2009. p. 95.
- Vitruvius Pollio, M., (85-20 BC) “*The ten Books on Architecture*”
- Wittmann, F. H. (1977) “*Grundlagen eines modells zur beschreibung charakteristischer iigenschaften des betons*”, Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, Heft 290, 1977, 42-101.
- Zhutovsky, S., Kovler, K., Bentur, A. (2001) “*Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage*”. Proc. Int. RILEM Conf. Early Age Cracking in Cementitious Systems, AEC’01, Ed. K. Kovler et al., Haifa, pp. 365-374.