

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

K. van Breugel*¹, T. A. van Beek¹

*Autor de Contacto: K.vanBreugel@tudelft.nl

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

Recibido: 18-12-2016 | Aceptado: 23-01-2017 | Publicado: 31-01-2017

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; diseño de mezcla; contracción autógena; códigos.

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>

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

Información Legal

Revista ALCONPAT é una publicación da Associação Latino-americana Controle de Qualidade, Recuperação Patologia e Construção, Internacional, A. C., Km. 6, antiga carretera a Progresso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: 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 de este número, ALCONPAT Unidade Computing, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga carretera a Progresso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores no 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.

Cualquier discusión, incluindo a réplica dos autores, serao publicados na terceira edición do 2017, desde que a información é recebida antes do encerramento da segunda edición 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.

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

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.

1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento está en todas partes a nuestro alrededor. Las enormes montañas parecen mantener su forma para siempre. Sin embargo al acercarnos vemos que la superficie de las piedras cambia gradualmente. Cambia en las condiciones de temperatura y humedad, desgaste, viento y luz son suficientemente poderosos para desmoronar hasta la roca mas fuerte. Edad de las montañas! Terremotos pueden dividir montañas, causando cambios en el estado de tensiones de las partes recién formadas de la montaña. Las superficies de las fracturas recientes quedan expuestas a las condiciones climáticas y comienza otro ciclo de envejecimiento.

Como las rocas, las estructuras artificiales también son expuestas a las condiciones climáticas del ambiente. Cuando se exponen a cargas ambientales, las estructuras deben soportar las cargas y su peso propio de forma segura durante toda la vida útil. Carreteras y ferrovias necesitan mantenimiento continuo. Si es planificado correctamente, los trabajos de mantenimiento minimizan los problemas patológicos y pueden mantenerlos a un mínimo costo. Si el mantenimiento llega tarde, una intervención costosa es necesaria y puede causar pérdida de tiempo y dinero, atrasos ó accidentes. Los costos directos por falta de infraestructura pueden ser enormes, mas los costos indirectos generalmente son muchas veces mayores. El buen funcionamiento de nuestra infraestructura es vital para la movilidad y economía del país. Lo mismo se aplica a nuestra infraestructura energética. Las centrales eléctricas para la producción

de electricidad y redes de distribución de energía deben funcionar de forma confiable durante 24 h por día durante todo el año. Los componentes que fallan pueden causar interrupciones de proceso costosas y pueden constituir en riesgo para la vida y la integridad física. La sustitución pro activa de componentes vitales de sistemas y estructuras es considerada una estrategia segura para prevenir fallas catastróficas. Sin embargo realmente sabemos que tan cerca estabamos de una falla catastrófica al momento en que esos componentes fueron sustituidos? La sociedad estaba realmente en riesgo o nosotros dañamos muchos componentes estando aún perfectamente operacionales sin mejorar sustancialmente la seguridad? En otras palabras: con cual precisión podemos preveer el progreso de los procesos de envejecimiento a partir del cual nuestro ambiente construido está sufriendo?

El envejecimiento está en todas partes, es inevitable. Sin embargo, no es fácil encontrar una definición clara e inequívoca de envejecimiento. El término envejecimiento es usado para cambios en el desempeño de los materiales con el tiempo, estructuras, sistemas, organizaciones, sociedades, gobiernos, softwares, sistemas económicos, organismos vivos, etc. Esos cambios en el desempeño pueden ser observadas en diferentes escalas. Pero cuales son las verdaderas fuerzas motrices por detrás de esos cambios? Antes de iniciar una tentativa de explicar lo que entendemos por envejecimiento, primero le damos una impresión de la relevancia social del envejecimiento de nuestros activos fijos, enfocado en el envejecimiento de nuestra infraestructura.

2. ENVEJECIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA Y DE LA SOCIEDAD

Para nosotros los países industrializados modernos, la infraestructura representa mas de 50% de la riqueza nacional (Long, 2007). Esta infraestructura consiste en carreteras y sistemas ferroviarios, obras hidráulicas, aeropuertos, centrales eléctricas y redes eléctricas. Sobre la base del Producto Interno Bruto (PIB) global. Para un PIB global de € 53 trillones en 2012, eso significa € 37 trillones.

El crecimiento económico es inconcebible sin el crecimiento de la infraestructura de un país. Para acompañar el crecimiento económico global, el informe McKinsey (Dobbs et al., 2013) estima una inversión necesaria en la infraestructura de € 42 trillones entre 2013 y 2030. Lo que significa una inversión anual de € 2,3 trillones, que representa cerca de 4,5% del PIB global. La inversión de € 42 trillones es necesaria para carreteras y vias férreas, puertos, aeropuertos, centrales eléctricas, obras hidráulicas y de telecomunicaciones. La tabla 1 presenta la división de los inversionistas en estas categorías. Estos números son (en parte) basados en una extrapolación a partir de datos facilitados por 84 países.

Tabla 1. Necesidades estimadas de infraestructura global en diferentes categorías. Período 2013-2030 (Dobbs et.al., 2013)

Categoría	Fuente	Inversión necesaria [× € 1,000,000,000,000]
Carreteras	OECD ¹⁾	12.2
Ferrovías	OECD	3.3
Puertos	OECD	0.5
Aeropuertos	OECD	1.4
Energía	IEA ²⁾	8.8
Agua	GW ³⁾	8.4
Telecomunicaciones	OECD	6.8
Total		41.4

1) Organization for Economic Co-operation and Development

- 2) International Energy Agency
- 3) Global Water Intelligence

Esos países son responsables por 90% del PIB mundial y son considerados la mejor base posible para estimar las inversiones extras necesarias para nuestra infraestructura en el período de 2013 a 2030.

3. ENVEJECIMIENTO Y CIENCIA

3.1 Mudanza de desempeño con el tiempo

La vida precoz de materiales artesanales, estructuras y sistemas es caracterizada frecuentemente por una probabilidad elevada de falla. Es necesario algún tiempo para superar problemas iniciales inevitables de alcanzar el nivel necesario de madurez y estabilidad. Una vez que ese punto es abordado, un período de "silencio" sigue hasta que llegamos nuevamente a un período de probabilidad creciente de falla. Exceder una determinada probabilidad predefinida de falla marca el fin de la vida útil de una estructura o sistema. La alta probabilidad de falla al inicio, o período posterior de "reposo" y el período siguiente de aumento de probabilidad de falla puede ser presentado con la curva de la "bañera" (Figura 1a).

En esencia, la curva de "bañera" también se aplica a nuestros activos fijos, aun cuando no haya sido muy frecuentemente utilizada para infraestructura. La duración del período en que la probabilidad de falla es baja es de crucial importancia para el desempeño económico de esos activos. La curva de la "bañera" sugiere que este período es un período durante el cual "nada sucede". Es el período de "descanso", o período "dormido". Asumir que en el período de baja probabilidad de falla nada sucede, sin embargo, es engañoso. Se hubiese realmente "descanso", lo que pudeira ser la fuerza motriz por detrás del aumento de la probabilidad de falla con el transcurrir del do tiempo? Para ilustrar el razonamiento anterior, colocar la curva de "bañera" de la Figura 1a invertida puede ayudar, como se ve en la Figura 1b. En el eje vertical, ahora colocamos 'Desempeño' en vez de la 'Probabilidad de falla'. Luego de un corto período de problemas iniciales, el material, la estructura o el sistema alcanzaron el nivel (elevado) de desempeño necesario. Esse es el nivel en que el material debe demostrar su capacidad de atender a los criterios de seguridad y funcionales, si es posible sin intervención para mantenimiento o reparación. Es el período de "deporte de alto nivel" para todos los bloques de construcción básicos, es decir, átomos, moléculas y sus interfases, a partir del cual es hecho un material o estructura. Cuando estos bloques de construcción básicos desisten y abandonan su posición, o período de deterioro que empieza. Entonces el envejecimiento há empezado! Estos primeros pasos minúsculos de decaimiento probablemente no serán observados en la macro escala inmediatamente.

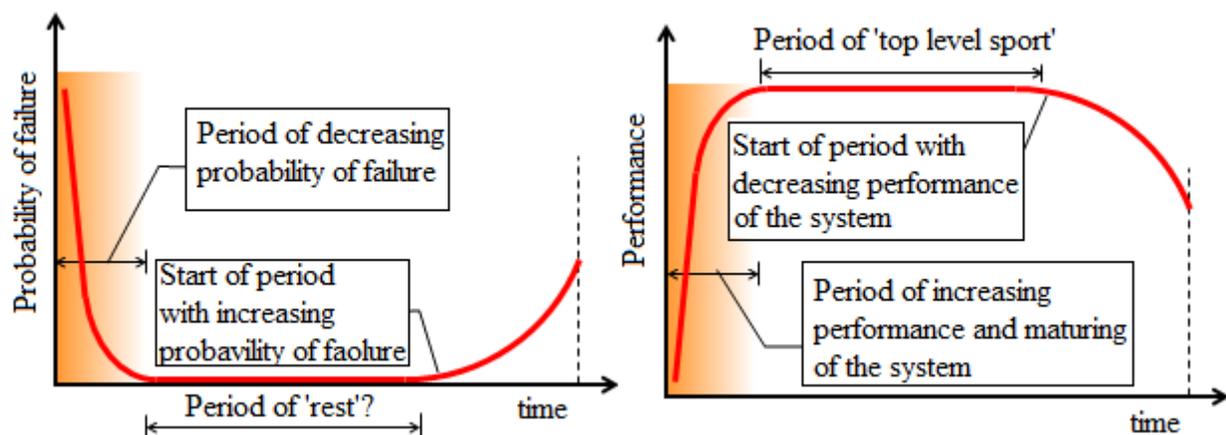


Figura 1. Evolución de la probabilidad de falla (curva de bañera) y de desempeño (derecha) de sistemas complejos (luego de Van Breugel, 2014)

El momento en que los primeros bloques de construcción básicos ceden solo se puede comprender con modelos apropiados de comportamiento de los materiales como resultado de niveles subsecuentes de observación. Aquí la química, la física, la electroquímica, la mecánica y la matemática se encuentran y necesitan unos de los otros para desarrollar herramientas para describir y prever procesos de envejecimiento a un nivel fundamental.

3.2 Fuerzas motrices por detras del envejecimiento - Una mirada mas atenta.

Envejecimiento puede ser definido como una mudanza de desempeño de un material, estructura ó sistema con el tiempo. Como el tiempo por si solo puede resultar en un cambio de desempeño, no es fácil de entender a primera vista. Como un material "en reposo" puede mudar su desempeño con el tiempo? Una mirada mas atenta a cualquier parte de materia "en reposo" dice que el status de reposo solo se aplica a una cierta escala de longitud. Para la escala atómica el mundo está en movimiento todo el tiempo! Las entidades fundamentales, esto es, bloques de construcción básicos, se mueven continuamente con una cierta probabilidad de dejar su posición para aquella que mejor se adapta a ellas. Ese fenómeno ocurre en el dominio del tiempo. Es una característica inherente de la materia y es la base del envejecimiento de los materiales. Sobre esta característica inherente vemos, en diferentes escalas, un número de gradientes, lo que puede hacer con que los bloques básicos de construcción de la materia para comenzar a moverse. Gradientes son las fuerzas motrices causando cambios al material con el transcurrir del tiempo. Observe que el limite de cualquier parte del material con sus gradientes de ambiente existe. Estos gradientes se refieren, por ejemplo, a la temperatura, humedad y la radiación y pueden causar alteraciones sobre la superficie del material.

El precedente ilustra que un material "en reposo" es difícilmente concebible. En menores escalas hay movimiento el tiempo todo es una variedad de gradientes causan los bloques básicos de construcción de la materia para cambiar su posición. En esencia, eso vale para todos los materiales y sistemas. Bloques de construcción básicos se dirigen para una posición (nivel de energia), donde se sienten más confortables. Al concebir materiales de una forma inteligente, esto es, minimizando gradientes internos y concentraciones de tensiones y deformaciones, habrá una menor razón para bloques de construcción básicos abandonar su posición. Así, el proceso de envejecimiento disminuirá, la vida útil de los materiales, estructuras y sistemas aumentará.

4. DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

4.1 Desempeño de tableros de puentes - Un inventario.

En marzo de 2001, los resultados de un estudio muy interesante fueron publicados por Mehta (Mehta e Burrows, 2001). El analizó el desempeño de tableros de puentes construídos en cuatro períodos subsecuentes del siglo XX. El primero fué el período anterior a 1930, el segundo entre 1930 y 1950, el tercero de 1950 a 1980 y el cuarto de 1980 hasta hoy. Las mezclas de concreto utilizadas para los tableros de puentes fueron caracterizadas por la composición química y por la finura del cemento. Los cementos utilizados en el primer período, antes de 1930, tenían una dosis de C_3S inferior a 30% y una superficie Blaine de 180 m^2/kg . Consecuentemente, la hidratación fué baja. El desempeño de muchos de los tableros de puentes hechos con estos cementos fué muy bueno.

Los cementos utilizados en el segundo período fueron triturados con una finura Blaine entre 180 y 300 m^2/kg . La tecnologia de construcción usada para los tableros de puentes fué semejante a la utilizada en el primer período. Los autores relatan que los tableros del puente construídos en el segundo período fueron menos durables que aquellos construídos antes de 1930.

Las estructuras construídas entre 1950 y 1980 parecen tener más problemas de durabilidad que las construídas antes de 1950. Los cementos utilizados en este período tuvieron una finura hasta 400 m^2/kg y un contenido de C_3S superior a 60%. Con el objetivo de obtener un concreto más denso y mas durable, la relación a/c fué menor que en los dos primeros períodos. El mayor Envelhecimento de estruturas de concreto antigas e modernas – Observações e pesquisas

contenido de C_3S y la mayor finura del cemento aumentaron la resistencia inicial de estas mezclas. Esto hizo posible la construcción más rápida. Sin embargo esto logro una mayor probabilidad de fisuración térmica agravada por una mayor retracción autógena de la relación agua cemento baja. La mayor tendencia para la micro fisuración en una edad precoz fué la razón más plausible para explicar problemas de durabilidad en edades posteriores.

En el cuarto período, la tendencia para alcanzar resistencias más elevadas continuó. Generalmente, esto fué posible usando mezclas con una baja relación a/c. El uso de mezclas con baja a/c aumentó aún más el riesgo de fisuras. Para tableros de puentes, fueron encontrados resistencias moderadas entre 30 MPa y 45 MPa. Entre 29 tableros de puentes, la fisuración en tableros de puentes de 44 MPa fué dos veces mayor en tableros de puentes de 31 MPa.

4.2 Estudio de tipos de mezclas y tendencia al envejecimiento

El estudio de Mehta sobre el desempeño de tableros de puentes ilustra como la presión del mercado para construir más rapidamente crea una demanda por mezclas con una resistencia inicial elevada. Esto fué posible usando cementos más finos con una mayor cantidad de C_3S . El precio de esto, entretanto, era una probabilidad más alta de fisuración en las primeras edades de los tableros del puente.

Para la construcción de estructuras más esbeltas y más elegantes es necesaria una resistencia final más elevada. Las altas resistencias son alcanzadas por la reducción de la relación a/c. El uso de superplastificantes hizo posible reducir la relación a/c de dosis de concretos para valores hasta inferiores a 0,2. Con estas mezclas de baja a/c, se obtuvieron concretos densos con baja permeabilidad. Ello se consideró benéfico para la durabilidad del concreto. Así mismo, se observó un aumento en la tendencia del concreto microfisurarse, principalmente por causa del aumento de la retracción autógena.

Otra razón para un mayor riesgo de fisuración de concretos de alta resistencia y ultra-alta resistencia son las altas temperaturas que ocurrem debido al alto consumo de cemento. Al optimizar la agrupación de las partículas de los agregados, a cantidad de cemento e, conseqüentemente, as temperaturas máximas, pueden ser reducidas. Un bajo consumo de cemento también es considerado positivo desde el punto de vista de la sustentabilidad (menor contenido de carbono en la mezcla de concreto fresco). Un bajo contenido de cemento, tiene también un inconveniente. Un bajo consumo de cemento reduce la capacidad inherente de autocicatrización del concreto. Desde el punto de vista de la autocicatrización, un consumo de cemento no muy bajo o el uso de cemento "viejo", molido gruesamente, es favorable. Esto explica en parte el resultado del estudio de Mehta que los tableros de puentes antiguos tienen un mejor desempeño que los más juvenes. En la terminología de este artículo, diríamos que las antiguas dosis de concreto con cementos gruesos con bajo contenido de C_3S eran menos propensos al envejecimiento que las dosis modernas con cementos finamente triturados con alto contenido de C_3S .

5. RETRACCIÓN AUTÓGENA - Una mirada más atenta

Para entender el envejecimiento de mezclas de concreto tradicionales y modernas, necesitamos una imagen clara de los procesos que causan tensiones internas en el material. Según lo discutido en la sección 3, esas tensiones internas están entre las fuerzas motrices del envejecimiento. Una de las causas de las tensiones internas es la retracción autógena del concreto endurecido. En esta sección, son presentados los resultados experimentales de la retracción autógena de mezclas de concreto tradicionales y de alta resistencia, bien sea como medidas tecnológicas para mitigar la retracción autógena. La retracción autógena medida será comparada con valores dados por las normas de proyectos atualmente utilizadas.

5.1 Retracción - factores de influencia.

Vários mecanismos han sido propuestos como posibles causas de retracción autógena y/o factores contribuyentes. Los mecanismos más comunmente relatados son la tensión capilar (en el rango de humedad relativa interna alta), los cambios en las láminas hidratadas (con humedad relativa en escala promedio) y los cambios de tensión superficial de las partículas sólidas de gel. Un parámetro comun en todos esos mecanismos es la humedad relativa interna. Con el proceso de hidratación el agua de la mezcla es gradualmente consumida y la humedad relativa disminuye. Este "secado interno" acompaña el aumento de la presión capilar en el agua de los poros y, cuando la humedad relativa disminuye aún mas, pueden ocurrir destrucciones localizadas. En consecuencia el volumen da pasta de cemento disminuye, lo que es conocido como retracción autógena.

La retracción del secado de la pasta es restringida por las partículas de agregado en la mezcla. Si la restricción de las tensiones de la retracción autógena pueden causar microfisuración, dependerá del tamaño y la rigidez de las partículas de agregado y las propiedades dependientes del tiempo (fluencia, relajamiento) del endurecimiento de la pasta. Como el curado interno de las mezclas de concreto puede ser usada para prevenir una caída en la humedad relativa es, por lo tanto, de la retracción autógena, y será discutida a continuación.

El hecho de la evolución de la retracción autógena estar fuertemente correlacionada con una disminución de la humedad relativa interna no significa que la magnitud da retracción autógena pueda estar directamente relacionada con la humedad relativa. El tipo de cemento también es un parametro importante (Tazawa y Miyazawa, 1997). En la fase temprana de la hidratación algunos tipos de cemento muestran expansión. Esta observación es de extrema importancia cuando se trata de la interpretación de las medidas de retracción. Los investigadores deben estar concientes del hecho que, particularmente en la fase inicial del proceso de hidratación, las tensiones de retracción medidas son el resultado líquido de mecanismos de expansión y contracción simultáneos. En esos casos, atribuir tensiones de retracción medidas en un único mecanismo llevará a conclusiones completamente erradas sobre los mecanismos subyacentes y en consecuencia las medidas erradas para prevenir ó mitigar la retracción autógena.

A partir de esta breve visión general, aprendemos que una serie de parametros afectan la magnitud de la retracción autógena. Al manipular estos parámetros, las consecuencias da retracción autógena pueden ser mitigadas y resultando la susceptibilidad das mezclas del concreto al envejecimiento. En las próximas secciones, el enfoque será la retracción autógena y el curado interno del HPC y como el curado interno reduce la retracción autógena.

5.2 Retracción autógena en mezclas C55/65 y curado interno.

Según lo indicado en la sección anterior, la retracción autógena de mezclas de baja relación a/c puede ser reducida por el curado interno. Este se puede conseguir adicionando partículas de agregado liviano (LWA) saturadas con agua al concreto (Zhutovsky et al., 2001). Cuando la RH interna cae, el agua almacenada en las partículas de LWA es liberada para la matriz de secado, manteniendo así la RH a un nivel relativamente elevado. Un efecto semejante puede ser obtenido con la adición de polímeros absorbentes (SAP), una tecnología promovida por Jensen (2013) y tema del comite RILEM 225-SAP (Mechtcherine e Reinhardt, 2012).

Serán presentados los resultados de los estudios sobre la retracción autógena del concreto y el efecto del curado interno. Los primeros resultados de ensayos sobre la retracción autógena de mezclas de concreto C55/65 son discutidos, seguidos de los resultados obtenidos con las mezclas C28/35 y C35/45.

5.2.1 Antecedentes del estudio.

En los años ochenta y noventa del siglo pasado, el uso de concreto de alto desempeño (HPC) con resistencia C55/65 fué considerado para varios puentes de concreto en Holanda. La norma de proyecto holandesa predominante no exigia que los proyectistas considerasen la retracción Envelhecimento de estruturas de concreto antigas e modernas – Observações e pesquisas

autógena de tales mezclas. Por tanto, el propietario de los puentes, el Ministerio de Transportes holandes, exigió una verificación del desempeño general de las mezclas, incluyendo una verificación de la retracción autógena y la eficacia del curado interno para mitigar el riesgo de fisuras a edades tempranas.

5.2.2 Estudio de tipos de mezcla y muestra de prueba.

Cuatro mezclas fueron ensayadas con a/c variando de 0,34 a 0,39. Las composiciones de las mezclas son presentadas en la Tabla 2. El tipo de mezcla I, usó 60 kg de polvo calcáreo, y la cantidad de cemento fué reducida por la misma cantidad. En la mezcla IV, 25% del agregado grueso fué sustituido por agregado liviando saturado con agua, Liapor F10. La retracción autógena fué medida en muestras selladas, 100 x 100 x 400 mm³.

Tabla 2 Composiciones de mezcla de HPC (C55/65) (Van Breugel et.al., 2000)

Componente	Tipo de mezcla				
	Unit	I	II	III	IV
Agua	kg/m ³	133	153	156	156
CEM III/B 42.5 LH HS	kg/m ³	248	340	300	300
CEM I 52.5 R	kg/m ³	112	110	100	100
Calcáreo en polvo ¹⁾	kg/m ³	60	--	--	--
Relación agua /cemento		0.37	0.34	0.39	0.39
Arena 0 – 4 mm	kg/m ³	942	860	830	830
Agregado piedra 4–16 mm	kg/m ³	997	980	975	730
Liapor F10, 4-8 mm	kg/m ³	--	--	--	156
HR Superplast. CON 35	kg/m ³	5.0	--	--	--
Cretoplast CON 35	kg/m ³	--	1.8	--	--
Cretoplast SL01 CON 35	kg/m ³	--	7.2	--	--
Adición BV1	kg/m ³	--	--	1.6	1.6
Adición FM 951	kg/m ³	--	--	4.8	4.8

1) Finura 530 m²/kg

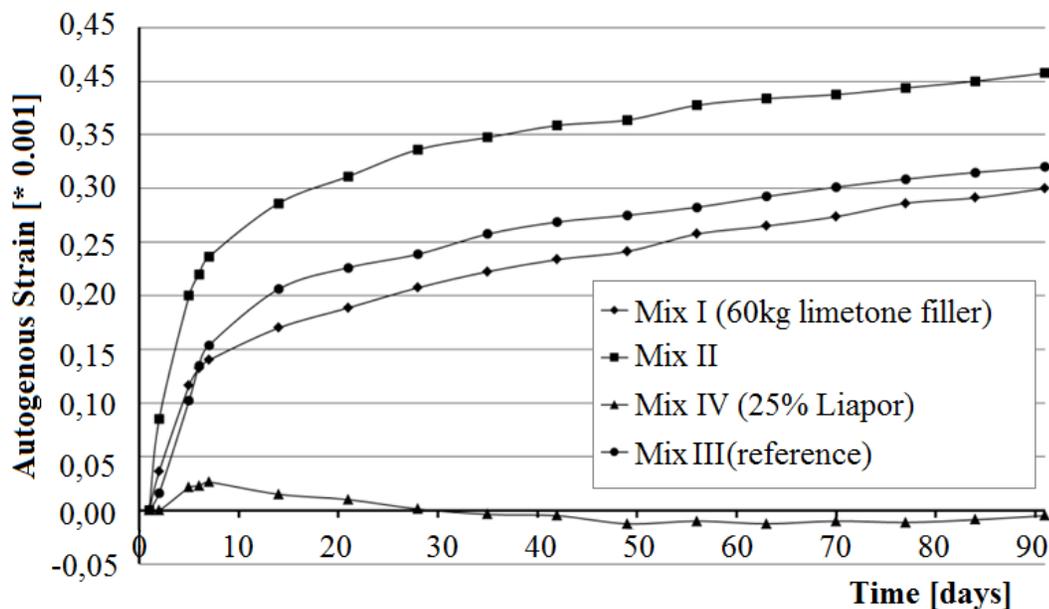


Figura 2. Retracción autógena de las mezclas I a IV. 20°C. Mediciones iniciadas luego de 1 día (Van Breugel et.al., 2000)

5.2.3 Medidas de deformación autógena y evaluación.

Las retracciones autógenas de las mezclas son presentadas en la Figura 2. Las mediciones comenzaron luego de 1 día. Esto implica que la primera parte de la deformación autógena no fué registrada. Esto no fué considerado un problema, una vez que el objetivo de la serie de ensayos era cuantificar como la retracción autógena afectaría la retracción por secado. En la práctica, la retracción no comenzará generalmente durante el primer día de vaciado. Para el propósito de este estudio fue apropiado, por tanto, medir solamente la retracción autógena luego del primer día.

Las curvas de retracción de las mezclas I, II y III muestran que una mayor parte de la retracción autógena ocurre en los primeros días luego del vaciado. Pasados los 28 días, la retracción autógena aún continua. De 28 a 91 días, la retracción autógena de las mezclas I, II y III varía de 70 a 90 $\mu\text{m m}$. La sustitución de 25% del agregado pesado por partículas de agregado liviano saturado con agua fué suficiente para eliminar la retracción autógena de la pasta. Obviamente el curado interno utilizando partículas de agregado liviano saturado (Liapor F10, 4-8 mm) es muy eficaz.

5.3 Retracción autógena de mezclas de concreto tradicionales C28/35 y C35/45.

La elevada retracción autógena de la mezcla C55/65, mucho mayor de lós esperado, fue motivo suficiente para iniciar una investigación sobre la retracción autógena de mezclas de concreto tradicionales con relaciones a/c entre 0,44 y 0,50, Clases de resistencia C35/45 y C28/35. Van Cappellen (2009) relató que, particularmente en edades tempranas, la retracción autógena de mezclas de concreto hechas con cemento de escória de alto horno se desarrolló más rápido que las mezclas de OPC. A los 200 días la diferencia no era grande. El estudio de Van Cappelle fue continuado por Mors (2011) para mezclas hechas con dos tipos de agregado, siendo calcáreo y cuarzo. Las composiciones de la mezcla son presentadas en la Tabla 3. Las Figuras 3 y 4 muestran la retracción autógena de las mezclas tradicionales T (0,50) y T (0,44) hechas con agregado de cuarzo y las mezclas N (0,50) y N (0,46) hechas con agregado de calcáreo. Las curvas de retracción muestran de forma convincente que las mezclas con a/c en el rango de 0,44 a 0,5 también presentan sustancial retracción autógena. Más importante aún, estas mezclas también exhiben retracción autógena en edades superiores de 28 días, la edad en que el concreto generalmente alcanza su mayor madurez!

Tabla 3. Composiciones de las mezclas de concreto C28/35 y C35/45 (Mors, 2011)

Concreto	T (0.50)	T (0.44)	N (0.50)	N (0.46)
Clase de resistencia	C28/35	C35/45	C28/35	C35/45
CEM III/B (kg/m^3)	340	340	340	360
LSP filler (kg/m^3)	--	--	20	20
a/c de proyecto	0.50	0.44	0.50	0.46
SPL (% M/M _{cem})	0.2	0.2	0.2	0.2
Agregado fino	Sand 0/4	Sand 0/4	Sand 0/4	Sand 0/4
Agregado grueso	Gravel	Gravel	Limestone	Limestone
Proporciones	4/8, 8/16	4/8, 8/16	6/20	6/20

T = Mezcla tradicional (agregado de cuarzo); N = Las mezclas hechas con calcáreo natural como agregado

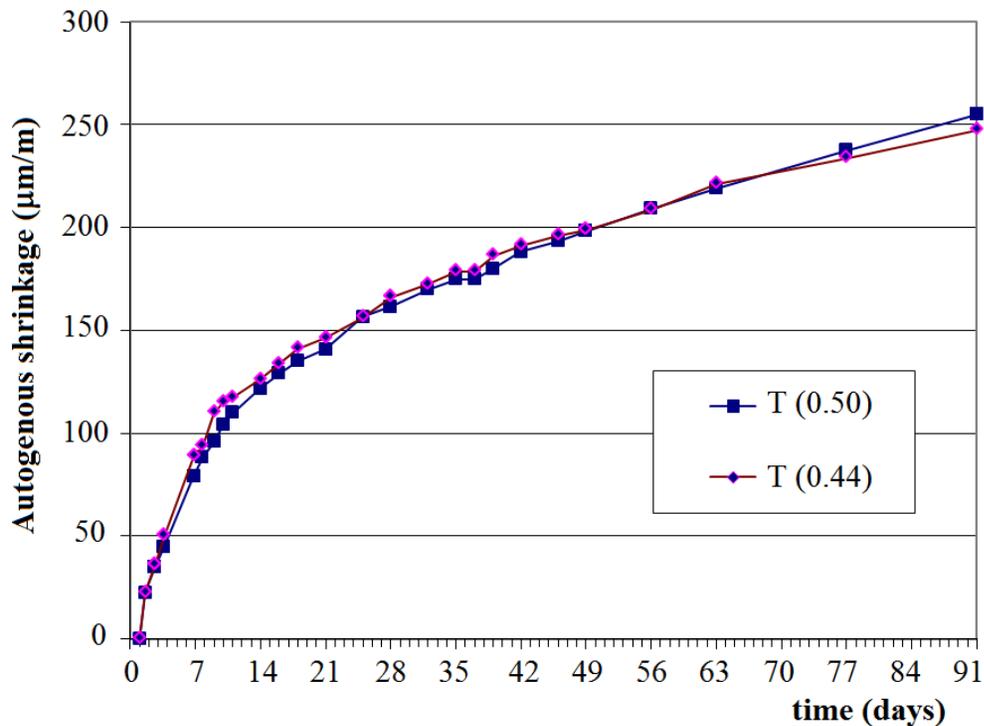


Figura 3. Retracción autógena de mezclas tradicionales T(0.50) e T(0.44). Agregado de cuarzo. $a/c = 0.5$ e 0.44 (Mors, 2011; Van Breugel et.al., 2013)

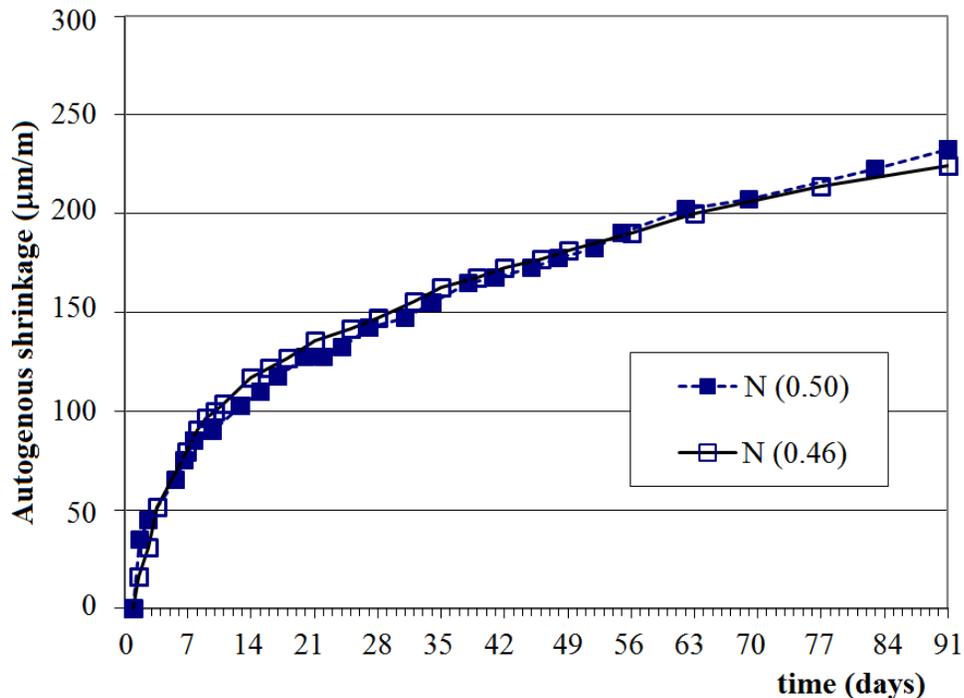


Figura 4. Reducción autógena de mezclas N(0.50) y N(0.46). Agregado calcáreo. $a/c = 0.46$ e 0.50 (luego Mors, 2011; Van Breugel et.al., 2013)

5.4 Retracción autógena, retracción por secado y normas de proyecto.

En el pasado estudios experimentales sobre la retracción por secado de concreto fueron frecuentemente realizados en muestras con 28 días de edad y las curvas de contracción medidas fueron en gran parte interpretadas como retracción por secado. A partir de las curvas de retracción autógena presentadas en las secciones anteriores, tenemos que concluir, entretanto, que

luego 28 días no es posible ignorar la retracción autógena, inclusive para mezclas con relaciones agua -cemento mayores que 0,4. Para estas mezclas, la contribución de la retracción autógena para las curvas de contracción medidas en muestras secas ha sido frecuentemente negligentes. Esto significa que en el pasado muchos ensayos de retracción de secado pueden haber sido mal interpretados. Una parte sustancial de las curvas medidas en muestras secas debió ser atribuida a la retracción autógena. En actualizaciones recientes de las normas de proyecto, la retracción autógena está ahora explícitamente mencionada, también para mezclas tradicionales con $a/c > 0,4$. El nuevo EuroCode 2 y la norma japonesa, la retracción autógena es considerada también para mezclas con Clases de resistencia $< C55/65$.

Para mezclas con a/c 0,44 - 0,50, estas normas aún sub estiman la retracción autógena, al menos para las mezclas ensayadas y los tipos de cemento considerados en las secciones anteriores. La Figura 5 muestra la retracción autógena de acuerdo con el EuroCode 2 y la norma JSCE, juntamente con la retracción autógena medida en concretos de resistencia normal C28/35 (T (0,50)). Son presentadas tanto a retracción autógena medida como la curva posterior a la corrección para la pequeña pérdida de humedad a través del sello. La retracción autógena de acuerdo con el EuroCode 2 es presentado para las mezclas C28/35 y C35/45, es decir, mezclas con resistencias semejantes a la resistencia medida en las mezclas consideradas en esta investigación. Para ambos casos, la retracción autógena de acuerdo con el EuroCode 2 es cerca de 30% de la retracción autógena medida. La subestimación de la retracción autógena por el EuroCode 2 también fue observada por Darquennes et al. (2012). Las previsiones con la norma japonesa están más próximas de los valores medidos, sin embargo se sub estima la retracción autógena medida.

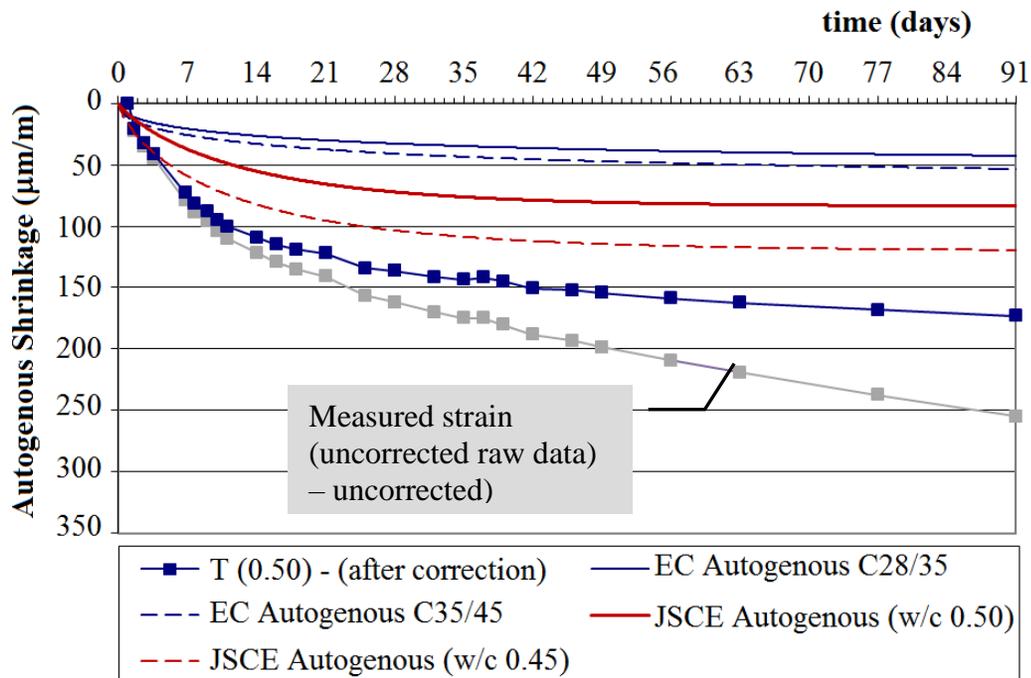


Figura 5. Comparación de la retracción autógena medida con previsiones del EuroCode 2 y la norma japonesa

5.5 Retracción y Envejecimiento.

La retracción autógena y de secado acompañan la evolución de las tensiones internas. En ambos casos, la pasta de cemento es el componente que se contrae. Todas las tensiones inducidas por la retracción están sujetas a la relajación. Esa relajación de las tensiones, no es "gratuita". Esta requiere la re estructuración de pequeños bloques de construcción de materia. Es decir: la edad material! En lo que respecta las curvas de contracción autógena, ha sido propuesto que las deformaciones a largo plazo observadas pueden ser curvas de fluencia siguiendo las curvas de

retracción elásticas ejercidas por las fuerzas capilares en el agua de los poros. Además esas deformaciones de fluencia no son "gratuitas", pero requieren la re estructuración de los elementos elementales del material: El material envejece! Para el análisis cuantitativo de la fluencia y la relajación, Wittmann (1977) aplicó el concepto de energía de activación, considerado el enfoque más apropiado para la investigación fundamental de fenómenos de envejecimiento de materiales basados en cemento.

6. ENFRENTAR EL ENVEJECIMIENTO

6.1 Diseño de materiales.

El envejecimiento es una característica inherente a los materiales. Las soluciones para problemas de envejecimiento exigen, intervenciones a nivel de los materiales fundamentales. Para lidiar con problemas de envejecimiento, son concebibles dos enfoques, esto es el preventivo y el reactivo.

El enfoque preventivo, el foco está en el proyecto de materiales homogéneos con el menor número posible de gradientes internos, concentraciones de tensiones e interfases. Para materiales heterogéneos, como el concreto, este es un gran desafío. Al pasar por las escalas de estiramiento resultado del nivel (sub) nano al meso, el concreto se comporta como un sistema complejo. Es decir el concreto es un "producto en la mente" (McCarter, 2009), cuyas propiedades son determinadas por las propiedades de los componentes individuales y las interfases entre ellos. Algunos de estos componentes - en verdad todos! - cambian con el tiempo, y así crean las propiedades de las interfases. Eso hace los materiales heterogeneos susceptibles al envejecimiento.

El enfoque reactivo, la heterogeneidad del material y por lo tanto, las concentraciones internas de tensiones y de deformaciones y la ocurrencia de daños internos y envejecimiento, son consideradas una cuentión de hecho. Si el envejecimiento es en verdad, inevitable, la autocicatrización podría ser una solución para problemas de envejecimiento. Cuando se trata de concreto, la presencia de partículas de cemento aún no hidratadas proporciona una capacidad inherente de autocicatrización. A este respecto, el concreto hecho con un cemento grueso es considerado favorable al concreto elaborado con un cemento fino. La observación de Mehta (2001) de que los tableros de puentes antiguos, construídas con cemento grueso, presentan mejor desempeño que las construídas con cementos más finos, podrían ser explicadas, al menos en parte, por el papel de autocicatrización de las estructuras más antiguas. La tendencia moderna en primer lugar, usar cemento mas fino para acelerar el rango de ganancia de resistencia y en segundo lugar, reducir la cantidad de cemento para reducir la acción del CO₂ del concreto, puede trabajar negativamente sobre la resistencia del material contra el envejecimiento! En estos casos, el análisis envolviendo al ciclo de vida es necesaria para obtener los pros y contras de las tendencias modernas en la concepción del tipo de mezcla de concreto.

6.2 Envejecimiento y normas de proyecto.

Para la concepción y realización de estructuras de concreto, las normas de proyecto son indispensables. De los numerosos edificios y obras de construcción fascinantes realizadas en el pasado, hay un alto grado de madurez de estas normas que puede ser inferido. En la sección 5.4, vimos, que las normas prescriptivas normalmente utilizadas fallan en describir el desempeño a largo plazo, es decir la contracción de estructuras de concreto. En esse sentido, es interesante reflexionar sobre la tendencia reciente de cambiar de normas para normas basadas en desempeño. La cuestión es saber sise puede esperar que, con esta mudanza, los aspectos del envejecimiento sean consideradas de forma más adecuada y pasen a formar parte de un abordaje de proyecto integral para las estructuras de concreto. Estrictamente hablando, la mudanza de normas prescriptivas para normas basadas en desempeño es un retorno al origen de la profesión de constructor. Antiguamente, todo el proceso de construcción estaba en las manos de una persona:

el constructor. El constructor tenía la responsabilidad integral de cumplir todos los criterios de seguridad y los funcionales establecidos por el propietario.

Como el constructor logra cumplir los criterios del propietario, no fue establecido en detalles. Todo esto fue considerado competencia y la responsabilidad del constructor. En su libro clásico sobre tecnología de construcción, Vitruvio (85-20 a.C.) afirmó que preferiblemente todo el proceso de construcción debería estar en las manos de una persona. Cuando Vitruvio escribió su libro, algunos años a.C., percibió que esa situación ideal ya no era sustentable. El proceso de construcción se volvió mucho más complicado que una sola persona no podría ser un especialista en todas las áreas del proceso de construcción. Gradualmente, el constructor tuvo que compartir su responsabilidad con los demás. Esta situación comienza a surgir de certificados y, luego, normas prescriptivas. El usuario de estos documentos podrá ser responsabilizado por la correcta interpretación y cumplimiento de normas, pero no por el contenido de la norma.

Las normas pueden ser juzgadas como la consecuencia final de un proceso de creciente fragmentación del proceso de construcción y más importante, de la Visión de que todo, incluyendo la calidad, es “ingenierible”. Los enormes problemas de sustentabilidad que enfrentamos hoy, nos muestran que esa Visión perdió la mayor parte de su poder convincente. Normas obligatorias, hasta las más detalladas, son necesarias, pero insuficientes para garantizar calidad y/o sustentabilidad. Normas obligatorias se enfrentan con las propiedades de materiales con el objetivo principal de ofrecer al proyectista los datos necesarios para proyectar estructuras seguras. Cualquier alteración del desempeño de los materiales con el tiempo es considerada una propiedad dependiente del tiempo sin abordar la causa de esas alteraciones.

Con normas basadas en desempeño, el proceso de construcción fue devuelto al constructor, incluyendo el desafío de realizar (a largo plazo) criterios de calidad y metas de sustentabilidad. La libertad del constructor de decidir cómo atender esos criterios y objetivos puede estimular al constructor a invertir en investigación fundamental de materiales de construcción tradicionales y nuevos y en conceptos de proyecto innovadores. Además las normas basadas en desempeño, en combinación con los nuevos contratos DBFM (Design-Built-Finance-Maintenance), también obligarán al constructor a enfocarse tanto en desempeño a corto y a largo plazo, así el envejecimiento de materiales y estructuras. Para ello, el constructor necesitará de modelos predictivos confiables, que incluyan modelos para cuantificar la tasa de procesos de envejecimiento y sus consecuencias.

7. INVERSIÓN NECESARIA PARA GENERAR ECONOMÍAS

En la sección 2, fue explicado que el envejecimiento de los bienes de capital fijo, es decir el ambiente construido de la nación es un gran gasto financiero para la sociedad. Una manera de reducir este gasto será reduciendo los costos de mantenimiento extendiendo el tiempo de vida de nuestra infraestructura. Eso resultará en economías en los costos anuales de reposición de estructuras obsoletas. Para realizar estas economías debemos invertir! Potenciales ahorros justifican y exigen inversiones en la investigación del envejecimiento. Algunos números claves pueden ayudar a obtener una imagen indicativa de la inversión necesaria para realizar un cierto nivel de ahorro. En la sección 2, el valor global del inventario de infraestructuras fue estimado en 37 trillones de euros. Suponiendo una vida útil promedio de estos activos de infraestructura de 50 años. A cada año, 740 billones de euros deben gastarse en la sustitución de activos obsoletos.

Suponiendo además aun cuando, a través de investigaciones específicas, la vida útil promedio pueda ser aumentada en 10%, se decir, de 50 a 55 años. Los costos anuales de sustitución disminuirían de 740 para 670 billones de euros. Se trata de una reducción de 70 billones de euros por año. Supongamos que, para economizar estos 70 billones de euros, debemos invertir 20% de este monto en investigación, es decir 14 billones de euros por año. Supongamos que 50% de los recursos necesarios para la investigación, sean 7 billones de euros, deben ser gastados en la investigación orientada para la gestión y otros 50% en la investigación científica sobre Envejecimiento de estructuras de concreto antiguas e modernas – Observações e pesquisas

materiales y estructuras. Una parte de esta pesquisa orientada para la ciencia debe ser dedicada a la investigación del envejecimiento. Un presupuesto razonable, pero conservador, es que 10% de la investigación orientada a la ciencia, es decir 0,7 billones de euros por año debe gastarse en la investigación fundamental del envejecimiento. Estos 0,7 billones de euros representan apenas 1% de los ahorros previstos. Esquemáticamente, se muestra en la figura 6. Al variar las hipótesis en este ejercicio, son obtenidos otros valores para las inversiones necesarias, pero no alteran el orden de importancia de estos valores.

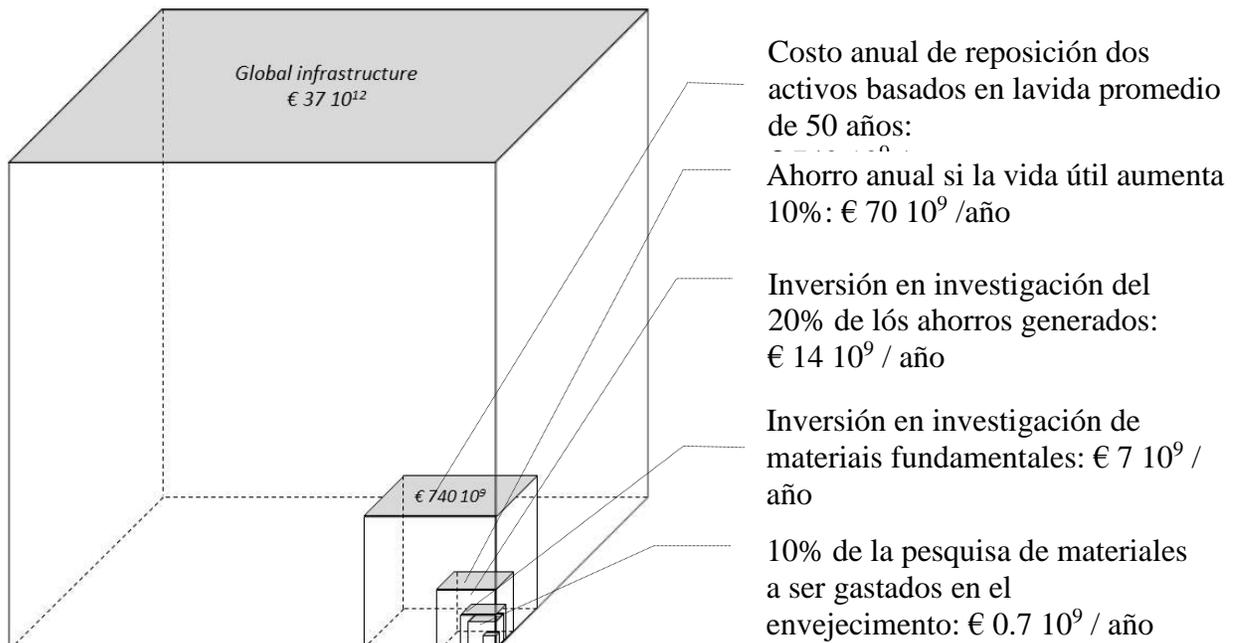


Figura 6. Presentación esquemática de la inversión necesaria en investigación del envejecimiento para realizar una extensión de vida promedio de servicio de 10%. (Intereses / inflación no considerados). Vida útil estimada 50 años.

8. OBSERVACIONES FINALES

La infraestructura de una nación conforma aproximadamente 50% de su riqueza nacional. Esta enorme cuota de nuestra riqueza nacional, sin embargo está envejeciendo! Con la existencia, el crecimiento, el mantenimiento y la sustitución del envejecimiento de la infraestructura, una enorme responsabilidad llega a todos los actores participantes de la planificación, proyecto, construcción y operación de nuestros activos. Es una cuestión de responsabilidad para mitigar el impacto ambiental que viene junto con la realización y operación de nuestra infraestructura.

La investigación fundamental sobre el envejecimiento es recomendada para mejorar las herramientas para previsiones precisas y confiables del desempeño a largo plazo de nuestra infraestructura de envejecimiento. Los resultados de investigaciones experimentales sobre la retracción autógena de materiales innovadores basados en cemento, tradicionales y modernos, ilustran la necesidad de más investigaciones para entender mejor la causa de la retracción autógena, bien sea como posibilidades (algunas veces inesperadas) de mitigar la retracción autógena, por ejemplo, usando residuos de baja tecnología, como cenizas de cáscara de arroz (Tuan, 2011). La reducción de la retracción implica mitigar las tensiones inducidas por retracción y por lo tanto, reducir el nivel de envejecimiento.

Las normas de proyecto basadas en el desempeño, en combinación con nuevos contratos en que el constructor es responsable por el desempeño a largo plazo y funcionamiento de sus estructuras, generan una gran necesidad de conocimiento de los fenómenos de envejecimiento en los

materiales y estructuras. De esta forma, las normas basadas en el desempeño pueden estimular la búsqueda por soluciones innovadoras.

Como muchas otras industrias, la industria de la construcción también está sobre presión. Las estructuras deben ser hechas más rápidamente, pero con menor impacto ambiental. Cualquier producto, por ende, realizado bajo presión, independientemente del tipo de presión, tiende al envejecimiento al pasar el tiempo. Para lidiar con el riesgo de aumentar los rangos de envejecimiento, es necesario el conocimiento profundo del desempeño de materiales y estructuras con el pasar del tiempo.

Un aumento de la vida útil promedio de nuestra infraestructura en 10% ahorraría decenas de billones de euros anualmente. Las inversiones necesarias para realizar estas economías son estimados en 20%. Se presume que la mitad de ese monto es necesario para la investigación de materiales y estructuras, de los cuales 10% fueron considerados necesarios para la investigación fundamental sobre el envejecimiento. Establecer objetivos de ahorro no solo es un desafío es un estímulo para la investigación e innovación. Los números también ilustran que cuidar de nuestra infraestructura tendrá finalmente éxito.

9. AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo fué basado en el Documento de Visión del Centro de Envejecimiento para Materiales, Estructuras y Sistemas de la Universidad Técnica de Delft. Agradecemos especialmente al Centro de Envejecimiento haber dispuesto este importante documento como material de soporte para este artículo.

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 Bouny 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 eigenschafften des betons*”, Deutscher Ausschuss für 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.