ENVEJECIMIENTO A MEDIANO PLAZO DE PROBETAS DE CONCRETO: FACTOR INCIDENTE EN LAS ESTIMACIONES DE VIDA ÚTIL

L. EBENSPERGER ¹, M. OLIVARES²

¹ Doktor Ingenieur, Consultor en Tecnología del Concreto, Construtechnik Ltda., Chile

² Ingeniero Civil, Jefe Sección Servicios Especiales, Área Resistencia Materiales, DICTUC, Chile

RESUMEN

Cuatro series de mezclas de concreto, preparadas con cemento portland puzolánico, 4 razones agua/cemento y 3 condiciones de curado inicial distintas, se han mantenido por un período de casi 3 años en condiciones de cámara seca en laboratorio, procediéndose a ejecutar a distintos intervalos de tiempo 6 diferentes ensayos de desempeño. Se buscó conocer la variación que estos resultados experimentan con la edad, a modo de determinar el factor de “envejecimiento” asociado, valor fundamental en los diferentes análisis de Vida Útil que consideran el modelamiento del ingreso de cloruros al concreto. Fue posible concluir que el factor “*m*” considerado habitualmente como un valor fijo, o nulo a partir de cierta edad, presenta un comportamiento dependiente de la edad del concreto.

Palabras clave: Concreto, durabilidad, cloruros, ensayos de desempeño, Vida Útil.

ABSTRACT

Four sets of concrete mixtures containing Portland pozzolanic cement, using 4 water /cement ratios and 3 different initial curing conditions, and have been maintained for a period of just about 3 years under dry chamber laboratory conditions. Six different performance tests were made during this period at different time intervals. The goal was to determine the variation with age of the results of these performance tests, in order to determine the associated "aging" factor, a fundamental value in the different Service Life analysis that consider the modeling of chloride ingress to concrete. It was possible to conclude that the factor "*m*", which is considered as a fixed value, or null from a certain age, presents a behavior dependent on the age of the concrete.

Keywords: Concrete, durability, chlorides, performance tests, Service Life.

RESUMO

Quatro séries de misturas de concreto, preparadas com o cimento Portland pozolânico e 4 relações água /cimento e, 3 condições diferentes de cura inicial, foram mantidas por um período de quase 3 anos sob condições de câmara seca no laboratório. Tendo sido realizados em distintos intervalos de tempo, 6 testes de desempenho diferentes. Buscou-se conhecer a variação que esses resultados poderiam vir a apresentar com o passar do tempo, a fim de determinar o fator "envelhecimento" associado com o valor fundamental nas diferentes análises da vida-útil, que consideram a modelagem da entrada dos íons cloratos ao concreto. Foi possível concluir que o fator "*m*" habitualmente considerado como valor fixo, ou nulo a partir de um certo tempo de "vida", apresenta um comportamento de acordo com a idade do concreto.

Palavras-chave: Concreto, durabilidade, cloratos testes de desempenho, Vida Útil.

1. INTRODUCCIÓN

El recubrimiento es la capa de hormigón que cubre al acero de refuerzo y que la protege del ingreso de agentes dañinos, tanto el dióxido de carbono que genera la carbonatación de la pasta de cemento, y el ingreso de cloruros a través de la microestructura porosa de éste. Ambos fenómenos llevan finalmente a la corrosión del refuerzo de acero de los elementos estructurales, afectando seriamente la Vida Útil de la estructura. Dos son los parámetros que definen la Vida Útil: el espesor de esta capa y la capacidad resistente de ésta, la que es determinada por la permeabilidad del hormigón que la compone. La Figura 1 muestra esquemáticamente esta situación, dejando de manifiesto que por factores constructivos habituales esta capa es de menor calidad que el hormigón que se ubica en el núcleo de un elemento.

Figura 1: Factores que afectan al Recubrimiento del Concreto

Diseñar por Durabilidad significa realizar análisis que contemplan modelos analíticos y probabilísticos que sean capaces de representar por un lado las propiedades características del hormigón y por otro los mecanismos de ingreso de las sustancias agresivas al hormigón. El conocimiento de estas propiedades, o dicho de otro modo, el desempeño en el tiempo de ellas, permiten realizar estimaciones para proyectos que requieren, por ejemplo, una vida útil de 100 años o incluso superior.

Una serie de ensayos han sido desarrollados mundialmente e incorporados en estos modelos de análisis. Se requiere contar con información actualizada de las propiedades del hormigón, tanto para el proceso de especificación como para la verificación mientras dura el proceso constructivo y en la obra terminada.

La primera parte de esta investigación se centró en obtener datos en forma sistemática del desempeño de mezclas de hormigón ejecutadas con materiales típicos de Chile, en que se consideró que el efecto de la razón agua/cemento (contenido de cemento) y las condiciones de curado de las muestras representarían adecuadamente el espectro de hormigones utilizados en la práctica. Esta segunda parte en cambio se centra en estudiar el comportamiento a edades mayores que 90 días. Mientras la resistencia sigue en aumento, en principio el desempeño debiese también aumentar, aunque existen visiones de diferentes autores y modelos que otorgan un período de incremento de la capacidad resistente del hormigón por un período de medio año hasta 30 años o incluso que continúa para siempre (Torrent, 2013; Di Pace et al, 2019). La incidencia de este efecto en los análisis de Vida Útil es muy significativa y puede alcanzar varios grados de magnitud.

2. MODELO SIMPLIFICADO DE INGRESO DE CLORUROS

Se considera que la 2da. Ley de Fick es la ecuación que representa de mejor forma el mecanismo de ingreso de cloruros al hormigón a través de la difusión. A continuación, se presenta el desarrollo de la correspondiente ecuación diferencial que incorpora el Contenido de Cloruros en la profundidad en función del tiempo:

$$\frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{(t)} \frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Dónde:

$C_{(x,t)}$ = Función de Concentración de Cloruros en la profundidad x y en el tiempo t .

$D_{(t)}$ = Coeficiente de Difusión de Cloruros en el tiempo t .

La Ecuación (1) no es posible de solucionar en forma directa, para lo cual ésta se simplifica suponiendo que el Coef. de Difusión es independiente y constante en el tiempo. La nueva Ecuación (2) tiene una solución explícita mediante el uso de la función error en Ecuación (3),

$$\frac{\partial C_{(x,t)}}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C_{(x,t)}}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{C_{(x,t)} - C_o}{C_s - C_o} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (3)$$

Cuando el frente de cloruros alcanza la armadura se cumple que el contenido de cloruros alcanza el contenido crítico para el cual se inicia la corrosión, $C_{(x,t)} = C_{cr}$. Lo anterior permite despejar la variable tiempo, que representa desde el punto de vista del Diseño, la Vida Útil del elemento de hormigón, según Ecuación (4):

$$T_i = \frac{x^2}{4D} \left(\frac{1}{\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr} - C_o}{C_s - C_o} \right)} \right)^2 \quad (4)$$

Dónde:

C_{cr} = Contenido Crítico de Cloruros que permite el inicio de la Corrosión en el acero [0.05% peso concreto = 1.20 kg/m³].

C_o = Contenido Base de Cloruros en los materiales componentes del hormigón [0.01% p.con.].

C_s = Contenido Superficial de Cloruros que depende del tipo de Exposición Ambiental -
Atmosférico 0.40% p.con. - Sumergido 0.83% p.con. - Zona de Mareas 0.70% p.con. y
Salpicaduras 1.0% p.con. (Li et al, 2014)

Dado que el Coef. de Difusión sí es dependiente del tiempo y disminuye a medida que la hidratación avanza (el hormigón es más denso y ofrece una mayor resistencia al ingreso de cloruros), el supuesto indicado en Ecuación (2) es compensado mediante la incorporación de un factor de envejecimiento m , que toma las siguientes formas:

$$D_t = D_o * \left(\frac{t_o}{t} \right)^m \quad \text{para } t \leq t_{hyd} \quad (5)$$

$$D_t = D_o * \left(\frac{t_o}{t_{hyd}}\right)^m \quad \text{para } t > t_{hyd} \quad (6)$$

Dónde:

D_t = Coeficiente de Difusión de Cloruros en el tiempo t .

D_o = Coeficiente de Difusión de Cloruros a la edad de $t_o = 28$ días

m = Coeficiente de Envejecimiento

t_{hyd} = Edad considerada como término del proceso de hidratación con relación a la disminución continua del Coeficiente de Difusión de Cloruros en el tiempo.

Figura 2. Valor relativo de la Difusión a Cloruros en función del Coeficiente de Envejecimiento y el término de la hidratación

3. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

Se caracterizaron las mezclas con los siguientes ensayos desempeño (ver Figura 3), cuya descripción en detalle del proceso de pre/acondicionamiento de las probetas y resultados se entregan en trabajo de los mismos autores (Ebensperger y Olivares, 2017) y que fueron presentados en el Congreso CONPAT 2017 en Asunción, Paraguay:

- **Resistencia a la Compresión f'_c (NCh1037, 2009).**
Se mide la propiedad resistente de la probeta en ensayo de compresión en cilindros de Ø150x300mm. El acondicionamiento consiste en dejar durante las primeras 20 horas los moldes en la cámara húmeda, para luego retirarlos. A continuación, las probetas se mantienen en cámara húmeda a 20 ± 3 °C y al menos 95% de humedad hasta la edad de ensayo. El resultado final es el promedio de 3 mediciones [MPa].
- **Resistividad Eléctrica SR (AASHTO T358, 2017).**
Con el método Wenner se mide la resistencia al paso de corriente, en 4 generatrices de la superficie de un cilindro de Ø150x300mm. El acondicionamiento consiste en mantener las probetas en cámara húmeda a 20 ± 3 °C y al menos 95% de humedad hasta la edad de ensayo. Por cada probeta la medición se repite en ambos sentidos. Son 3 probetas. El resultado final es el promedio de 24 mediciones, salvo indicación específica [Ωm].
- **Permeabilidad al Agua WP (NCh 2262, 2009).**
Se somete una cara de un cubo de 15x15cm durante 3d a una presión de 0.5 MPa. La probeta se rompe por hendimiento y se mide la penetración máxima de agua. El resultado final es el promedio de 2 mediciones [mm]. La superficie superior no tiene ningún tratamiento.
- **Penetración de Cloruros $RCPT$ (ASTM C1202, 2012).**
Se somete un disco de Ø100x50mm ubicado entre 2 soluciones (3.0% de NaCl y 0.3N Na(OH)) durante 6h a una tensión de 60V, forzando la migración de iones cloruro a través de ella, desde

la cara moldeada hacia la expuesta. Se mide la cantidad de corriente que pasa en este lapso de tiempo. El resultado final es el promedio de 2 mediciones [Coulomb].

- **Migración de Cloruros RCM** (NT Build 492, 1999).

Se somete un disco de Ø100x50mm ubicado entre 2 soluciones (10.0%NaCl y 0.3N Na(OH)) durante 24h a una tensión determinada de acuerdo al método que varía entre 60V a 25V (tensión inicial medida), forzando la migración de iones cloruro a través de ella, desde la cara moldeada hacia la expuesta. Una vez finalizado el ensayo, se rompe por hendimiento la probeta y se mide la penetración promedio del frente de cloruros en forma colorimétrica (rociado de nitrato de plata). El resultado final es el promedio de 2 mediciones [10^{-12} m²/s].

- **Difusión de Cloruros CCD** (ASTM C1556, 2011).

Se sumergen las probetas de Ø75x120mm durante 90d en solución saturada de NaCl. Se determina el perfil de cloruros en la profundidad de la probeta, tomando una cantidad fija de perfiles de acuerdo a la razón agua/cemento de la mezcla. Una vez logrado el pre-acondicionamiento se coloca la probeta en un recipiente con una solución de cloruro de sodio (165+-1 g/litro solución) por 90 días. El resultado final es la determinación del coeficiente de difusión de 2 testigo por edad de ensayo [10^{-12} m²/s].

- **Permeabilidad al Aire kT** (SIA 262/1-E, 2013).

Se genera sobre la superficie de un cubo de 15x15cm un vacío durante 60s con una celda de doble cámara. Se mide luego en la celda interior la velocidad con que aumenta la presión, mientras se mantiene un flujo de aire perpendicular a la superficie. Esta normativa se aplica sobre el concreto colocado en obra. De acuerdo a Recomendaciones de MAS Standard for kT Lab Testing (MAS, 2014), en condiciones de laboratorio se retiran las probetas desde el agua y se secan por 3 días en horno a 50°C y se dejan enfriar. Adicionalmente se verifica que la humedad superficial sea menor a un 5.5%. El resultado final es el promedio de 4 mediciones [10^{-16} m²].

Resist. Eléctrica

Permeabilidad al Agua

Permeabilidad al Aire

Difusión Cloruros

Migración Cloruros

Penetración Cloruros

Figura 3. Ensayos utilizados en la investigación.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 Condiciones de Curado

El experimento realizado se basó en exponer en condiciones de laboratorio distintas probetas moldeadas a partir de una misma mezcla de concreto, a tres tratamientos de curado, en los que se hizo variar el

lapso durante el cual se mantuvieron en cámara húmeda (20°C; >90% HR), para luego dejarlas secar en condiciones de cámara seca (23°C; 50% h.r.). Los tipos de Curado se denominaron como:

- A. 28 días en cámara húmeda y exposición posterior al ambiente de cámara seca (Curado 28d – C28d).
- B. 7 días en cámara húmeda y exposición posterior al ambiente de cámara seca (Curado 7d – C7d).
- C. 1 día en cámara húmeda y exposición posterior al ambiente de cámara seca (Curado 1d – C1d).

Durante el primer día todas las probetas fueron mantenidas en molde en cámara húmeda y se mantuvieron luego del curado inicial en saturación en cámara húmeda hasta la edad de ensayo.

4.2 Materiales y Dosificaciones

Se realizaron cuatro mezclas de concreto, en las cuales se mantuvo constante el contenido de agua en 174 lt/m³ y se varió el contenido de cemento para obtener mezclas con las siguientes razones agua/cemento:

- 250 kg/m³ de cemento --> a/c=0.70
- 288 kg/m³ de cemento --> a/c=0.60
- 346 kg/m³ de cemento --> a/c=0.50
- 425 kg/m³ de cemento --> a/c=0.40

Los detalles de los materiales constituyentes y de dosificación se indican en investigación ya señalada (Ebensperger y Olivares, 2017).

Se utilizó cemento Portland Puzolánico de Alta Resistencia habitual en Chile, con un contenido de puzolana máximo del 30%. Se utilizó una mezcladora tipo vertical de 250 lt. y por cada amasada se prepararon:

- 24 cilindros de Ø150*300mm
- 18 cubos de 150*150mm
- 3 paneles de 400x400*120mm

4.3 Ensayos de Control en Hormigón Fresco

Para cada amasada se determinaron las siguientes propiedades del Hormigón Fresco:

- Temperatura del hormigón y ambiental
- Contenido de aire y densidad del hormigón
- Docilidad mediante Cono de Abrams

5. RESULTADOS

A continuación, se repasan los principales resultados de la Primera Parte de esta investigación.

5.1 Caracterización de Concretos mediante Resistencia a la Compresión

El seguimiento del desarrollo de la resistencia a la compresión en el tiempo de los concretos curados hasta 28 días, muestran un aumento de resistencia proporcional al aumento del contenido de cemento de las mezclas (reducción de razón a/c), tal como muestra la Figura 4. A grandes rasgos, las mezclas fabricadas corresponden a concretos tipo G60, G50, G40 y G30 respectivamente (Resistencia obtenida en condiciones normalizadas de curado a la edad de 28 días, equivalente a Curado Tipo A).

Figura 4: Efecto de la razón a/c y contenido de cemento sobre Resistencia a Compresión.

5.2 Efecto del Curado Inicial sobre la Resistencia a la Compresión

La disminución del curado inicial desde 28 a 7 días (desde Curado Tipo A a Tipo B) casi no produjo ningún efecto en la resistencia medida a los 28 días, y cuando este curado se reduce a tan solo 1 día (Curado Tipo C, significa que el concreto se mantuvo 1 día en su molde protegido de la pérdida de humedad), ésta disminuyó un 10%, como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Efecto de las condiciones de curado sobre Resistencia a Compresión a 28 días.

5.3 Resultados de Desempeño

El aumento de la razón a/c repercutió en casi todos los concretos en un aumento del respectivo valor que entrega cada ensayo como resultado, en concordancia con el aumento de la permeabilidad de la mezcla por el hecho de ser más porosa. Los valores extremos para el Curado Tipo A fueron:

- La Penetración de Agua aumentó desde 0 a 26 [mm]
- La Permeabilidad al Aire aumentó desde 0.013 a 0.258 [10^{-16} m²]
- La Penetración de Cloruros aumentó desde 5.709 a 12.445 [Coulomb]
- La Migración de Cloruros aumentó desde 13.0 a 49.8 [10^{-12} m²/s]

La Difusión de Cloruros aumentó desde 5.4 a 12.7 [10^{-12} m²/s]

A excepción de:

- La Resistividad Eléctrica Superficial disminuyó desde 7.0 a 6.0 [Ω m] (se podría considerar que casi no varió).

El efecto de disminuir el tiempo de curado inicial mostró una tendencia similar, pero en algunos casos se pudo comprobar un importante efecto de las condiciones de pre-acondicionamiento de la probeta previo a la ejecución del ensayo. Todos los ensayos de desempeño, a excepción de la Permeabilidad al Aire, han sido generados para ser ejecutados en condiciones de laboratorio, donde se debe lograr una condición previa de saturación máxima, que en algunos casos se realiza sometiendo a la probeta a

condiciones de vacío bajo agua. A pesar de que las probetas con Curado Tipo B y C se ejecutó este pre-acondicionamiento, al parecer no fue suficiente, dado que se observaron resultados dispares para las probetas con estos curados. En resumen, sólo se pueden considerar como válidos, de acuerdo a lo indicado en las respectivas normas, aquellos resultados obtenidos con las probetas con Curado Tipo A, que asimilan las condiciones de curado normalizado.

En cambio, el ensayo de Permeabilidad al Aire, el cual considera el efecto real que puede existir en obra en cuanto a la humedad superficial del concreto, logró mostrar el efecto esperado para la combinación de tiempo de curado y razón a/c, como se muestra en los resultados de la Tabla 1 y en el último gráfico de la Figura 6:

Figura 6. Resultados obtenidos en los Ensayos de Desempeño

En resumen, con el ensayo de Permeabilidad al Aire se pudo determinar que:

- para el Curado Tipo A, la mezcla más porosa con mayor razón a/c resultó ser 20 veces más permeable que la mezcla con menor razón a/c. Para el Curado Tipo C esta razón fue de 30 veces.
- Para la mezcla menos porosa con menor razón a/c la Permeabilidad al Aire fue 4 veces mayor con Curado Tipo C que con Curado Tipo A. Para la mezcla más porosa esta razón aumenta a 6 veces.
- Entre la mezcla más y menos permeable este ensayo permitió detectar una diferencia de 120 veces.

Tabla 1: Resultados de Permeabilidad al Aire a 28 días

Ensayo	Curado	Edad	Mezcla 070	Mezcla 060	Mezcla 050	Mezcla 040
Permeabilidad al Aire [10^{-16} m^2]	A: 28d húmedo	28d	0.258	0.089	0.037	0.013
	B: 7d húmedo	28d	0.519	0.105	0.036	0.024
	C: 1d húmedo	28d	1.546	0.204	0.112	0.052

6. RELACIONES ENTRE ENSAYOS

A pesar de que la resistencia corresponde al núcleo de la probeta y los ensayos de desempeño miden las características del recubrimiento, es posible observar buenas correlaciones entre algunos ensayos, como se observa en los gráficos de la Figura 7. Sólo la relación entre la Permeabilidad al Aire y la Resistencia incluye la totalidad de los resultados mostrados: las demás curvas sólo consideran los resultados a 28 días (línea roja).

Figura 7: Relaciones entre ensayos de Desempeño y Resistencia

Llama la atención el elevado valor que alcanzan ambos resultados relacionados a cloruros, en los cuales se fuerza el movimiento de iones cloruros por diferenciales de concentración y de potencial a través del concreto. Algunos autores mencionan que estos ensayos pueden verse fuertemente afectados por la presencia de otros iones asociados a la composición del tipo de cemento utilizado, cuyo estudio no ha sido parte de esta investigación.

Figura 8: Relaciones entre ensayos de Desempeño y Permeabilidad al Aire

La Figura 8 muestra que la relación entre la Permeabilidad al Aire y la Penetración de Agua y de Cloruros es del tipo semi-logarítmica (se consideran sólo datos de Curado Tipo A), en cambio al relacionarlo con la Migración de Cloruros la mejor relación se obtiene con una curva potencial, que es la que se acostumbra a utilizar entre estos 2 métodos. La relación entre los 2 ensayos de Cloruros a su vez mostró una relación lineal simple, muy similar a la existente entre Difusión y Penetración de Cloruros (Di Pace et al, 2019), demostrando adicionalmente que el efecto del curado afecta por igual a ambos métodos.

7. EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO

A partir de la Ecuación (5) se despejó el valor del Coeficiente de Envejecimiento m :

$$m = \frac{\log(D_t/D_o)}{\log(t_o/t)} \quad (7)$$

De acuerdo al Modelo fib Duracrete (fib, 2006), uno de los modelos más conocidos y usado mundialmente para la estimación de Vida Útil en el mundo, este valor depende de la combinación del tipo de cemento y del tipo de exposición a los cloruros, tomando valores entre 0.30 para cemento

Portland sumergido a 0.93 para cemento con escorias en zona de intermareas y salpicaduras, y con la salvedad que la validez del Coeficiente de Envejecimiento perdura durante toda la Vida Útil del concreto.

Los resultados de ambos ensayos de Cloruros se muestran en la Figura 9. Se observa para ambos casos la disminución esperada del valor medido y con una marcada tendencia a estabilizarse el valor después de los 100 días. El efecto se mantiene independiente de la razón a/c involucrada. Lo anterior pone de manifiesto que la resistencia al ingreso de cloruros aumenta con el tiempo, ya sea si se determina a través de la Penetración de Cloruros Q o del Coef. de Migración de Cloruros M .

Figura 9: Aumento de la Resistencia al Ingreso de Cloruros con el tiempo

El cálculo del Coeficiente de Envejecimiento m , considerando tan solo los valores de los concretos con el Curado Tipo A, se presentan en la Figura 10 y Figura 11, para las mediciones de Migración y Penetración de Cloruros respectivamente. Al lado izquierdo de la Figura 10 se presentan las curvas referenciadas al valor medido a los 28 días. Un set de datos se considera como inválido en este proceso (zona achurada superior), y mediante el uso de la Ecuación (7) se determinó el valor promedio de m para cada una de las 3 edades de medición: 90d=3meses, 180d=6meses y 964d=3años. Este valor finalmente es graficado al lado derecho en función de la edad en años. La correlación encontrada para cada caso indica que, para las condiciones de esta investigación, secado después de la edad de 28 días, el Coeficiente de Envejecimiento m disminuye con el tiempo según lo indicado en cada correlación indicada en los gráficos.

Figura 10: Disminución de los valores de Migración de Cloruros y variación del Coeficiente de Envejecimiento m con el tiempo. Ensayo NT Build 492.

Para el caso de la Penetración de Cloruros fue posible considerar todos los datos analizados siendo la curva de correlación muy similar al caso anterior (ver Figura 11). En ambos casos se promedió el valor para las 4 mezclas con distintas razones agua/cemento.

Figura 11: Disminución de los valores de Penetración de Cloruros y variación del Coeficiente de Envejecimiento m con el tiempo. Ensayo ASTM C1202.

8. PRINCIPALES RESULTADOS

Ensayo	Curado	Edad	Mezcla 070	Mezcla 060	Mezcla 050	Mezcla 040
Penetración de Cloruros [coulomb]	28d	28d	12.445	12.356	7.030	5.709
		90d	6.087	5.943	2.907	1.977
		180d	5.384	4.768	2.234	1.355
		964d	5.752	4.123	2.578	1.119
Migración de Cloruros [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	28d	28d	49,8	27,6	21,3	13,0
		90d	28,3	26,0	12,0	6,3
		180d	26,7	24,7	9,0	4,7
		964d	30,4	26,1	12,8	5,1
Permeabilidad al Aire [10^{-16} m^2]	28d	28d	0,258	0,089	0,037	0,013
		90d	1,172	0,462	0,094	0,061
		180d	1,694	0,782	0,222	0,099
		964d	3,773	2,861	0,843	0,365

9. CONCLUSIONES

Para 4 mezclas de concreto, en las que se mantuvo constante el contenido de agua variando sólo el contenido de cemento, se midió, mediante el uso de seis métodos de ensayo vigentes, el desempeño del recubrimiento. Se estudió además el efecto del curado inicial en el desarrollo de estas características de los concretos. Las mediciones se prolongaron hasta casi 3 años, en condiciones de cámara seca.

Se concluye que para aquellos métodos de laboratorio que requieren, por lo general a la edad de 28 días, condiciones de pre-acondicionamiento tendientes a lograr una superficie saturada, no son aplicables a edades mayores en concretos que se han mantenido en condiciones diferentes, debido al efecto del grado de saturación existente en las probetas. Sin embargo, el análisis de los datos en que se mantuvieron las probetas durante los 28 días bajo agua permitió identificar correlaciones válidas y aceptables entre ellos, en especial con la Resistencia a la Compresión y la Permeabilidad al Aire.

El análisis de los resultados en el tiempo de la Penetración y Migración de Cloruros demostraron que el Coeficiente de Envejecimiento m determinado a partir de la disminución de ambos valores siguen una relación potencial en el tiempo, que difiere del enfoque actual que considera un valor fijo, que depende del tipo de cemento, con la posibilidad, según el modelo de Estimación de Vida Útil utilizado, se anule a partir de cierta edad tomando el valor cero. Lo anterior significa que el efecto de la hidratación sobre los valores de Penetración y/o Migración termina y los valores permanecen constantes.

Sin embargo, se debe recalcar que esta disminución progresiva del Coef. de Envejecimiento sería válida para concretos que han estado sometidos a condiciones de humedad, las cuales facilitan la continuidad de la hidratación del cemento, y podrían hacer variar las correlaciones determinadas.

10.BIBLIOGRAFÍA

AASHTO T358 (2017), "*Standard Test Method for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*", Estados Unidos.

ASTM C1202-12 (2012), "*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*", Estados Unidos.

ASTM C1556-11a (2011), "*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*", Estados Unidos.

Di Pace, G., Ebensperger, L., Torrent, R., Bueno, V. (2019), "*From Cradle to Maturity - A holistic service-life approach for concrete bridges*", Concrete International, April 2019.

Ebensperger, L., Olivares, M. (2017), "*Efecto de la razón agua/cemento, Condiciones de Curado y Edad en el Desempeño de Concretos durante su Vida Útil*", CONPAT 2017, Paraguay.

Fédération International du Béton (2006), Bulletin No. 34 "*Model Code for Service Life Design*," fib, Lausanne, Suiza.

Li, Q., Li, K., Zhou, X., Zhang, Q., Fan, Z., "Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong–Zhuhai–Macau sea link project," Structural Safety 53.

NCh1037-09 (2009), "*Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*", Chile.

NCh2262-09 (2009), "*Hormigón y Mortero – Determinación de la permeabilidad al agua – Método de la penetración de agua bajo presión*", Chile.

NT Build 492 (1999), "*Chloride Migration Coefficient from non-steady-state Migration Experiments*", Noruega.

SIA 262/1 Anhang E (2013), "*Betonbau - Ergänzende Festlegungen (Construcción en Concreto - Especificaciones Complementarias)*", Suiza.

Torrent, R. (2013), "*Service Life Prediction: Theorecrete, Labcrete and Realcrete Approaches*," SCTM3 Conference, Kyoto, Japan.

Materials Advanced Services (2014), "*NDT Measurement of the Permeability of Concrete to Air – Laboratory Procedure*", Argentina.