

La prueba de permeabilidad rápida a cloruros como índice de la durabilidad de las estructuras de hormigón

Rapid chloride permeability test as durability index of the concrete structures

B. MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. J. FLORES-MARTÍNEZ, R. URIBE-AFIF, O. MEDINA-HERNÁNDEZ

Centro de Tecnología, Cemento y Concreto. CEMEX

Fecha de recepción: 19-XII-02

Fecha de aceptación: 29-IV-03

MÉXICO

RESUMEN

Desde su lanzamiento, la prueba de permeabilidad rápida a la penetración de cloruros ha sido usada frecuentemente en la evaluación de la durabilidad en las estructuras de hormigón, ya que se puede establecer, en un tiempo relativamente corto, la determinación de la permeabilidad del material, dentro de un nivel de calidad que permite comparar hormigones en cuanto a esta característica. En este artículo se presenta una investigación en donde se evalúan diseños de mezcla con la finalidad de medir la participación y contribución de cada uno de los componentes que intervienen en la fabricación del hormigón, revisando con detalle su contribución en las propiedades finales del producto, sin olvidar sus efectos en su comportamiento en estado fresco o cuando se encuentra en fase de endurecimiento. En el trabajo se incluyen e identifican las variables de mayor influencia y su relación con la propiedad que modificaron en el hormigón.

SUMMARY

From the RCPT publication, this test has been frequently used in the concrete structures durability assessment. This test it could be determine in a relatively short time the material permeability, within a rank or quality level that allows comparing concretes as far as their characteristics. In this document, is present an intense investigation to evaluate mix designs with the principal objective to measure the participation and contribution of the components that take part in the concrete manufacture. A detailed review of the components contribution is applied to know specifically the properties in the product during any state: fresh or hard path. In this paper, are identified and included the most influence variables in the concrete properties modification.

PALABRAS CLAVE: permeabilidad, cloruros, resistividad eléctrica, relación a/c, humo de sílice.

KEYWORDS: permeability, chlorides, electrical resistivity, w/b ratio, silica fume.

1. INTRODUCCIÓN

Como es conocido en el campo de las estructuras durables, la corrosión del acero de refuerzo dentro de los elementos de hormigón, es una de las principales razones de deterioro y destrucción de las mismas. Dentro de las diversas soluciones para retardar el inicio

1. INTRODUCTION

As is well known, the steel reinforcement corrosion is one of the main reasons for destruction and deterioration in the concrete structures durable field. Into the several solutions to retard the beginning of this phenomenon in the reinforcement steel, one of the most important is the recover quality, it is to say, the

de este fenómeno en el acero de refuerzo, se debe considerar la calidad de la permeabilidad del recubrimiento. Para el caso específico de permeabilidad a cloruros, hoy en día, existen diversos métodos automatizados o manuales, con los que es posible medir la acumulación, cantidad, velocidad o tasa de penetración de estos iones, sin embargo, algunos de estos métodos pueden resultar un tanto imprecisos o de muy larga duración.

A partir de 1983, la prueba de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT), fue adoptada por la American Association of State and Highway Transportation Officials (ASTHO T 277) y por la American Society for Testing and Materials, (ASTM C 1202), este método, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" determina la resistividad que presenta el hormigón al paso del ion cloruro en tan solo 6 horas, al inducir un voltaje que polariza dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruro a penetrar en el hormigón.

Muchas y muy variadas son las opiniones acerca de la confiabilidad y eficiencia de la prueba, lo cierto es que, como en cualquier método experimental, la eficiencia dependerá, casi por completo, del grado de entendimiento y de la adecuada interpretación de resultados. Hoy en día, a pesar de todos los argumentos a favor y en contra del método, la RCPT es una prueba de calificación por durabilidad extensamente usada como especificación, donde, incluso, se incluyen penalizaciones económicas de acuerdo a sus resultados particulares.

Su uso se ha hecho extenso porque además de tener una buena correlación con la AASTHO T 259 (1), en poco tiempo se obtiene la clasificación de los diseños de mezcla, basándose en los márgenes marcados por las propias normas.

En este artículo se presenta una investigación en donde se prueban diferentes diseños de mezcla con el fin de analizar el grado de afectación de los diferentes factores que intervienen en un diseño de mezcla y su contribución en la disminución de la permeabilidad, además de observar el comportamiento de la conductividad de las soluciones porosas cuando en un diseño se usan aditivos minerales, como humo de sílice.

La RCPT resulta ser un método de prueba sencillo y que proporciona resultados rápidos y fáciles de interpretar, sin embargo, en casos específicos, no es recomendable su uso; para la correcta interpretación y clasificación de resultados, primero habrá que ver los problemas que esta prueba presenta.

impermeability degree to chloride or any other aggressive substance for the concrete or steel. Specifically, for cases as chloride ion penetration, nowadays exist several methods, manual or automatic, to measure the accumulation, quantity, velocity or penetration rate of this ions, nevertheless, some of this methods can be somewhat vague, or need to much time to be complete, this conditions it can do difficult the result interpretation and correlation soon as possible.

Since 1983, the Rapid Chloride Permeability Test (RCPT), was adopted by the American Association of State and Highway Transportation Officials, (ASTHO T 277) and accepted too by the American Society for Testing and Materials, (ASTM C 1202), this method, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", it can determine the concrete resistivity to chloride ion pass in just 6 hours, basically, 60V dc are induced to polarize two solutions, positive and negative poles, provoking the NaCl ion migration across the concrete.

There are several opinions about the confidence and efficiency of this test; the truth is that as any experimental method, the efficacy depends almost at all of the understanding degree and the adequate interpretation of results. Nowadays, with all the pros and cons arguments, the RCPT is a durability qualification test extendedly used as specification in projects with economical restrictions about their particular results.

Their use has been extends because it have a good correlation with the AASTHO T 259 (1) and because in just a short time it gives the mix designs classification based on the permeability margins marked by the standards.

In this paper an investigation appears in where different mix designs was tested with the purpose of analyzing the factors that influence the permeability diminution to chlorides of the concrete structures, besides is observed an analyzed the conductivity behavior of the pore solutions when mineral admixtures as silica fume are included in the mix design.

The RCPT is a simple test method with easy and rapid interpretation results, nevertheless, in specific cases their use is not recommended, for the correct results interpretation and classification, it must be necessary to understand the tests drawbacks.

Dentro de los casos no recomendados para su uso, se encuentran los hormigones que contengan acero en refuerzo o en fibras, carbono o algún otro material conductor de electricidad (2) ya que la conductividad de la pieza cambiará, proporcionando lecturas erróneas. Asimismo, los concretos con nitrato de calcio presentan en estudios anteriores a éste, una deficiencia en sus resultados en comparación con sus mezclas testigo (1).

La edad de prueba es otro factor fundamental en los resultados de la prueba, a pesar que las normas para pruebas de permeabilidad no indican una edad de manera estricta, es recomendable que se hagan a edades tardías de 90 días o más, debido a que en este período la reacción del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con los cementantes, a alcanzado un desarrollo óptimo, sobretodo cuando se contemplan adiciones minerales (3). Cuando son probados hormigones a edades menores a los 28 días, se pueden producir incrementos súbitos en el amperaje y, con ellos, en la temperatura de las soluciones, modificando la velocidad de hidratación de los C-H-S y la naturaleza de la estructura porosa (4,5).

Además de las deficiencias que las muestras pueden provocar, existen problemas que pueden presentarse si los procedimientos o equipos de prueba no son adecuados, o bien se cambia de operador o de laboratorio; algunas de estas deficiencias pueden provocar variaciones de hasta 50% en los resultados finales (3,4).

Debido a que el diseño de la RCPT indica el movimiento de todos los iones en la estructura y no solamente los de cloro, cuando se usan adicionantes minerales o aditivos como reductores de agua, superplastificantes o inhibidores de corrosión en exceso, pueden presentarse resultados erróneos, ya que existe una modificación de la composición química de la estructura porosa (6).

Sin embargo, cuando estas deficiencias son entendidas y se toman las medidas necesarias para no incurrir en ellas, este método de prueba puede ser altamente funcional y fiable, una de las mayores ventajas, es que la obtención de resultados se hace en un tiempo relativamente corto y la interpretación de éstos no dependerá del técnico, sino de los propios márgenes que la norma marca, además, la correlación existente con la prueba AASHTO T 259 es bastante aceptable, aun utilizando aditivos minerales, como metacaolín o humo de sílice (7).

Tan es así, que este método de prueba, además de ser el rector de la calidad de especificaciones por durabilidad en diversos proyectos alrededor del mundo (4,8,9), es empleado también como evaluación en la validación del uso de materiales destinados a reducir la permeabilidad,

In the not recommended cases are concretes with steel in reinforcement or fiber, carbon or any other conducting material (2) because the sample conductivity may be change and it could be misleading results. In the same way the concretes with calcium nitrate evaluated before this study it could be presented deficiencies vs. the control concretes (1).

The test age is another fundamental factor in the results, to grief that the standard permeability tests do not indicate an test age in a unrestricted way, is recommendable that becomes to delayed ages of 90 days or older; because in this period the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaction with the cementitious materials reach an optimal development, overall when minerals additions are contemplated (3). When concretes younger than 28 days of age are tested it can be produced sudden increases in the amperage and with them in the solutions temperature, modifying the C-H-S hydration velocity and the nature of the porous structure (4,5).

In addition to the deficiencies that the samples can cause, it can appear problems if the procedures or test equipment are not the adequate, or, if the operator or laboratory are changed, some of these deficiencies can cause variations of up to 50% in the final results (3,4).

Due to the RCPT design indicates the movement of all ions in the structure and not only those of chloride, when mineral additions or additives such as water reducers, superplasticizers or corrosion inhibitors in excess are used, can appear wrong results, because a pore structure solution has been modify in their chemical composition (6).

Nevertheless, when these deficiencies are understood and the measures necessary are taken to not incur in them, this test method can be highly functional and reliable, one of the greater advantages, is than the results it can be obtained in a relatively short time and the interpretation of these depends on the standards margins and not on the technician, in addition, the existing correlation with AASHTO T 259 chloride ponding test is quite acceptable, yet when mineral additives such as metakaolin or silica fume are used (7)

Thus, this test method is the director of the quality specifications by durability in diverse projects around the world (4,8,9), is also used as evaluation in the materials use validation destined to reduce the permeability, such as epoxic resins or superficial

como resinas epóxicas o selladores superficiales (4,10), u hormigones que contemplan diversas adiciones de materiales cementante suplementarios donde se han obtenido ganancias en la disminución de la permeabilidad con el uso de humo de sílice de hasta el 90% (6,11). De igual manera, esta prueba se ha utilizado para analizar el comportamiento de otros adicionantes minerales como ceniza volante y para establecer la relación existente entre la resistividad y la constante de permeabilidad del concreto obtenida por métodos que funcionan con presión atmosférica (12).

En esta investigación se decidió analizar diversas variables que influyen en los diseños de concretos durables, con la finalidad de establecer un parámetro que afecte a cada una de ellas y poder, así, diseñar hormigones específicos para cada condición particular de ataque, evitando sobreprotección y sobrecosto en la estructura.

2. EXPERIMENTACIÓN

2.1. Diseños de mezcla

El experimento se realizó con 62 diferentes diseños de mezcla, que agrupan diversas variables, diferentes relaciones a/c, consumos y tipos de cemento, tipos de árido grueso y diferentes niveles de adicionantes cementantes suplementarios (ACS) que fueron sustituidos por cemento en los diseños. Los materiales empleados y sus cantidades se muestran en la Tabla 1.

sealants (4,10), or concretes that contemplate diverse additions of cementitious materials where have been reported gains in the diminution of the permeability with the use of silica fume upper than 90% (6,11). In the same way, this test has been used to analyze the behavior of other mineral additions as fly ash and to establish the existing relation between the resistivity and the concrete permeability constant K, obtained by methods that work with atmospheric pressure (12)

In this investigation it was decided to analyze diverse variables that influence in the durable concrete designs, with the purpose to establish an affection parameter for each one of them and, to be able the specific concrete design for each particular attack condition, avoiding the structure over protection and over cost.

2. EXPERIMENTATION

2.1. Mixture designs

The experiment was made with 62 different mix designs, grouped by diverse variables, like different w/b ratios, cement amounts and types, types of coarse aggregate and different supplementary cementitious additions (SCA) that were replaced by cement in the designs. The employ materials and their quantities are shown in Table 1.

TABLA 1/TABLE 1

Variables del experimento
Variables in the experiment

Variables <i>Variables</i>	Cantidad <i>Quantity</i>	Tipo <i>Type</i>	
Relación a/c + cementante <i>w/b Ratio</i>	0.35 a 0.60		
Cemento <i>Cement</i>	250, 300, 350 y 400 kg/m ³	Tipo I y IP (ASTM) <i>Type I and IP (ASTM)</i>	CPO y CPP (NMX) <i>OPC and PPC (NMX)</i>
Cementantes Suplementarios <i>Supplementary Cementitious Materials</i>	5, 10 y 15%	Humo de Sílice <i>Silica Fume</i>	
Áridos <i>Aggregates</i>	Variable <i>Variable</i>	Grueso <i>Coarse</i>	Finos <i>Fines</i>
		Caliza y Andesita <i>Limestone and Andesine</i>	Andesita <i>Andesine</i>

Los resultados se presentan analizando cada variable en cada nivel de afectación y uso, tratando de determinar las cantidades y calidades óptimas para cada condición particular del uso del hormigón.

2.2. Acondicionamiento de las muestras

Todas las pruebas se realizaron a los 90 días de edad de las muestras y fueron preacondionadas para la prueba, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C 1202 (13). Los ensayos fueron hechos bajo las mismas condiciones de impregnación de resina, secado, temperatura y saturación para cada espécimen.

2.3. Método de prueba

El método de prueba se realizó siguiendo las pautas de la norma ASTM C 1202, asimismo, se utilizaron los márgenes de dicha norma para calificar los diseños de mezcla de acuerdo a su resultado individual y en promedio.

La prueba fue ejecutada con un equipo automatizado Proove IT, el cual proporciona el historial de lecturas de amperaje en intervalos de 5 minutos durante las 6 horas de prueba, arrojando, finalmente, el resultado en culombios y la clasificación del hormigón según los rangos de la ASTM C 1202 (Tabla 2).

El uso de un equipo automatizado proporciona ventajas importantes en la regulación de corriente y en la poca variación en el voltaje de salida, se calibra para que la

The results are presented analyzing each variable in each affectation level and use, treating to determine the optimal amounts and qualities for each particular condition of concrete use.

2.2. Samples preparation

All tests were made at 90 days old of the samples, and were prepared for the test, following the ASTM C 1202 (13) recommendations. The tests were done under the same conditions of resin impregnation, drying, temperature, relative humidity and saturation for each specimen.

2.3. Test method

The test method was made following the ASTM C 1202, also, the margins of this test method were used to qualify the mix designs according to their individual result and average.

The test was executed with an automated equipment, Proove IT, which provides the readings file of amperage and voltage at intervals of 5 minutes during the 6 hours test, throwing finally the result in coulombs and the concrete classification according to the ASTM C 1202 ranks (Table 2).

The automated equipment use provides important advantages in the current regulation and in the exit voltage little variation, it is calibrated so that the

TABLA 2/TABLE 2

Tipos de permeabilidad de acuerdo a la ASTM C 1202
Permeability classification by ASTM C 1202

Culombios <i>Coulombs</i>	Tipo de Permeabilidad <i>Permeability Type</i>	Típico de <i>Typical of</i>
> 4000	Alta <i>High</i>	Relaciones a/c altas <i>High w/c ratios</i>
4000 - 2000	Moderada <i>Moderate</i>	Relaciones a/c de 0.40 a 0.50 <i>w/c ratios from 0.40 to 0.50</i>
2000 - 1000	Baja <i>Low</i>	Relaciones a/c < a 0.40 <i>w/c ratios < 0.40</i>
1000 - 100	Muy Baja <i>Very Low</i>	Hormigones con Látex <i>Latex Concretes</i>
< 100	Despreciable <i>Negligible</i>	Hormigones con Polímeros <i>Polimeric Concretes</i>

variación sea de $\pm 0,1V$ durante las 6 horas de prueba y es importante que el equipo seleccionado no tenga variaciones mayores, ya que el porcentaje de variación puede ser equivalente al mismo porcentaje de error en el resultado final, prácticamente para cualquier tipo de permeabilidad (14). Otro factor de suma importancia es la capacidad limitada de 500 mA por canal y la capacidad máxima de salida en W relacionada directamente al número de canales provistos para la prueba. Dado que la variación de corriente dependerá de cada muestra, pudiendo ser desde 50 mA hasta más de 300 mA para hormigones de baja o alta permeabilidad respectivamente, el equipo automatizado cuenta con un seguro que interrumpe la corriente independiente de los canales que rebasen los 500 mA en menos de las 6 horas, evitando así sobre trabajar un canal provocando una caída de corriente en el resto de los canales (3).

La celda con contacto a la cara de enfase, fue llenada con solución de NaCl al 3%, polarizada como negativo, y la celda posterior, fue llenada con solución de NaOH al 0,3N, polarizada como positivo (Figura 1).

Las muestras se probaron en grupos de 8 piezas, con un diferencial máximo de edad de 2 días. Cada diseño de mezcla fue probado por triplicado, considerando una desviación estándar máxima del 20%, independientemente de la clasificación final del hormigón, repitiendo las muestras que no cumplieron con esta condición.

maximum variation be $\pm 0.1V$ during the 6 hours test and is important that the selected equipment does not have greater variations, because the same error percentage in the power supply could be equivalent to the same percentage in the final result for any type of permeability (14). Another importance factor is the limited capacity of 500 mA by channel and the maximum exit capacity in Watts related directly the number of channels provided for the test. Due to the current variation depends on each specimen, being able to be from 50 mA to 300 mA for low or high permeability concretes, the automated equipment account with a device that interrupts the independent current independent for each channel when they exceed 500 mA in less than 6 hours, thus avoiding overwork a channel causing a current fall in the rest of the channels (3).

The cell with contact to the top face, was filled with NaCl 3% solution, polarized as negative, and the other cell, was filled with NaOH 0.3N solution, polarized as positive (Figure 1).

The specimens were tested in 8 pieces groups, with a maximum age differential of 2 days. Each mix design was tested by triplicate, considering a maximum standard deviation of 20% independently of the concrete final classification, repeating the samples that did not fulfill the considered standard deviation in the experiment.

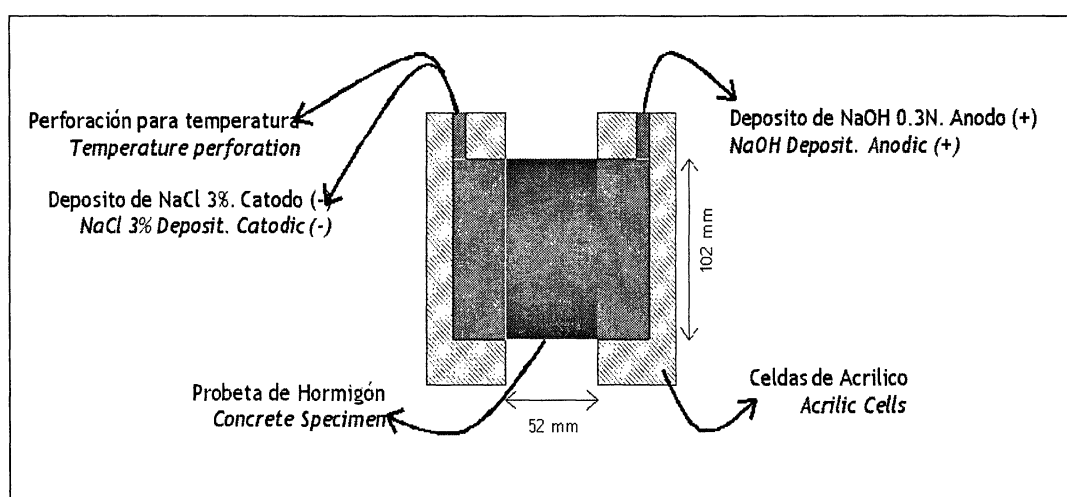


Figura 1.- Diagrama para el armado de las celdas de prueba.

Figure 1.- Test cell diagram.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Densificación de la pasta

El rol que juega la densificación de la pasta es de suma importancia e influye en cualquier factor secundario en el diseño de mezcla, incluso cuando se tienen áridos gruesos con porosidades considerables, su efecto negativo puede ser disminuido si la pasta que lo rodea es lo suficientemente cerrada y con estructuras porosas mínimas. Para lograr este efecto en la pasta de cemento, se pueden seguir tres caminos principales.

a) Relación a/c

Fundamentalmente, cuanto menos agua lleve un diseño de mezcla, los procesos de hidratación del cemento portland serán más uniformes, haciendo que las moléculas de cemento hidratadas dejen un espacio menor entre ellas generando una pasta más densa, menos porosa y regularmente de menor permeabilidad.

La relación existente es directamente proporcional, a menor relación a/c o a/cementante la disminución es igualmente menor. Otro factor importante a considerar, es que la disminución de la relación a/c es un proceso que no implica un incremento considerable en el costo de la mezcla y sí genera un impacto importante en la densificación de la pasta.

La tasa de disminución en la permeabilidad, afectada por este factor genera cambios altamente significativos en el comportamiento del hormigón, en los rangos manejados en este experimento, de 0,60 a 0,35, no existen igualdades entre una relación a/c y otra, sin embargo, habrá que considerar que, cuanto menos agua lleve un diseño de mezcla, la fluidez de la pasta será igualmente menor (Figura 2).

b) Adicionantes cementantes suplementarios

Con dos formas de actuar, el uso de ACS sustituido por cemento hasta en 15% puede reducir la permeabilidad de un hormigón en poco más de 50%.

La disminución obtenida con el uso de ACS es óptima a los 90 días de edad, de hecho, existe un diferencial aproximado de 20% (15,16) entre las muestras probadas a 28 y a 90 días, esto puede atribuirse a que en edades tempranas el material puzolánico no ha reaccionado en cantidad suficiente y solamente actúa como relleno entre las moléculas de cemento, a medida que la hidratación del cemento continúa su proceso regular, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible genera una reacción puzolánica con los ACS que terminara de llenar los huecos moleculares que la hidratación del cemento ha dejado, formando, a edades tardías, hormigones más densos.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Paste densification

The role that plays the paste densification is very important and it influences in any secondary factor in the mixture design, even when are coarse aggregates with considerable porosities, its negative effect can be diminished if the paste that surround it sufficiently close and with minimum porous structures. In order to obtain this effect in the cement paste, three main ways that can be follow.

a) w/c or w/b ratio

Fundamentally, how less water takes a mix design, the portland cement hydration processes will be more uniform, causing that the hydrated cement molecules leave a smaller space between them generating a more dense paste, less porously and regularly with a low permeability.

The existing relation is directly proportional, to low w/b ratio the diminution is equally smaller. Another important factor to consider, is that the diminution of the w/b ratio is a process that does not imply a very high increase in the mixture cost and it had an important impact in the paste densification.

The permeability diminution rate, for this factor, generate highly significant change in concrete performance, in the handled ranks in this study, from 0.60 to 0.35, there not exist equalities between any w/b ratio and another one. Nevertheless is necessary considered, how less water takes in a mix design the workability of concrete will be equally smaller (Figure 2).

b) Supplementary cementitious additions

With two act forms, the use of SCA replaced by cement until 10% can reduce the concrete permeability in more than 50%.

The diminution obtained with the SCA use is optimal until the 90 days old, in fact, exists a 20% (15,16) approximated differential between specimens tested to 28 days and the tested ones at 90, this can be attributable to that in early ages the puzzolanic materials has been not reached in a enough quantity and only acts as filler between the cement molecules, and as the cement hydration goes, the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ available generates a puzzolanic reaction with the SCA, this reaction will be finish the filling of the molecular hollows that the cement hydration has left, doing, to later ages, denser concretes.

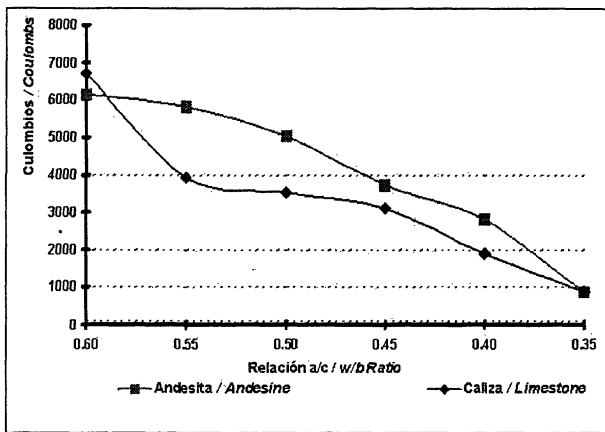


Figura 2.- Permeabilidad de acuerdo a la relación a/c y el tipo de árido grueso.

Figure 2.- w/c ratio and coarse aggregate permeability relation.

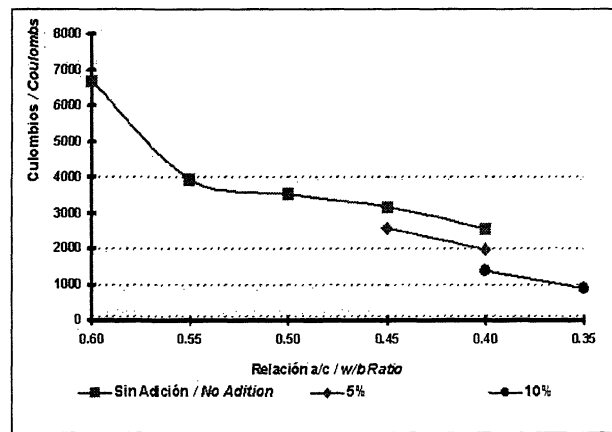


Figura 3.- Permeabilidad con relación a la dosificación de cementantes suplementarios y a la relación a/c + cementante.

Figure 3.- Supplementary cementitious and w/c ratio permeability relation.

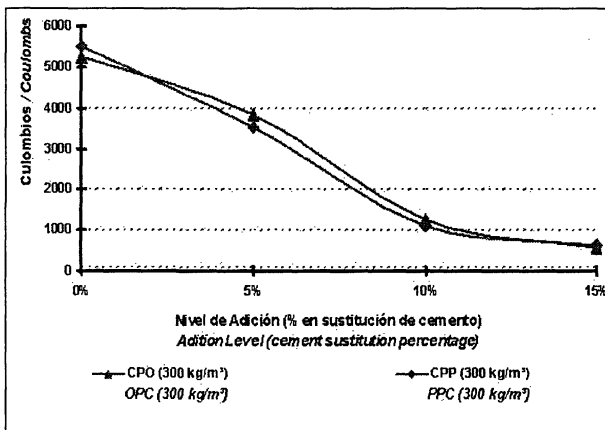


Figura 4.- Dosificación de cementantes suplementarios con dosificación a/c de 0,40 y 300 kg/m² de consumo de cemento.

Figure 4.- Supplementary cementitious addition with w/c of 0.40 and 300 kg/m² of cement amount.

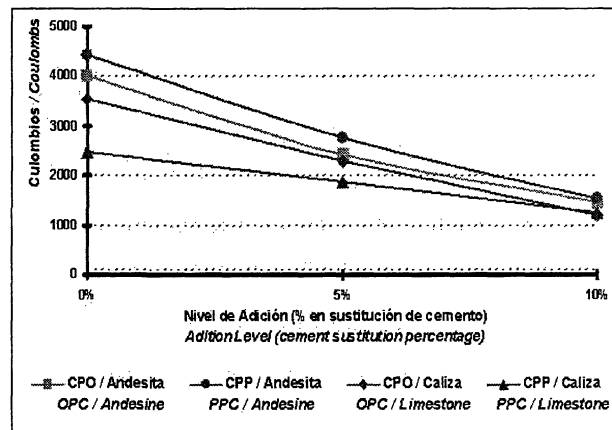


Figura 5.- Niveles de dosificación de cementantes suplementarios por tipo de cemento y árido grueso empleado.

Figure 5.- Levels of supplementary cementitious addition by cement and coarse aggregate type.

Con las dosificaciones de ACS experimentadas no existen igualdades, por lo que se abre un margen de diseño que permite controlar, con este factor, el nivel de permeabilidad requerido. Para establecer el rango máximo de dosificación se experimentó con un solo grupo de mezclas con la misma relación a/c y sustituciones de hasta 15%, sin embargo, desde la adición de 10%, el decremento de la permeabilidad presenta una ganancia insignificante (16). Esto es debido a que la cantidad de agua y cemento han ejercido de manera óptima su papel en el concreto, dejando muy pocos huecos donde los materiales silíceos puedan reaccionar, ocasionando un porcentaje considerable de ellos sin uso cementante en el hormigón (Figuras 3 y 4).

En el análisis de los resultados combinado el uso de ACS, tipo de árido grueso y tipo de cemento, es claro

With this additions does not exist equalities between them, reason why also opens a design margin that allow to control with this factor the permeability level required by the structure specific location. To establish the maximum addition rank it was experimented with a single mixes group with the same w/b ratio and additions until 15% nevertheless since 10% addition the permeability decrease present an insignificant gain (16). Due to water and cement quantity has been work in an optima way in the concrete, leaving a few hollows where the siliceous materials can reach, generating a considerable percentage of them without cementanting use in the concrete (Figures 3 and 4).

In the results analysis, mixing use of SCA, coarse aggregate type and cement type, are clear that the SCA

que los ACS son el factor fundamental para la disminución de la tasa de permeabilidad. Sin embargo, la influencia del árido grueso y el tipo de cemento siguen conservando sus tendencias y comportamiento. Mientras que para los diseños que no contienen ACS el diferencial es de hasta un 45%, para los diseños con contenidos de ACS en 10%, esta diferencia llega apenas a un 20% (Figura 5).

c) Variables en el uso de cemento

Es evidente que conforme se incrementa el consumo de cemento, la tasa de permeabilidad disminuye considerablemente, logrando reducciones cercanas al 50%. A medida que el consumo de cemento aumenta, el diferencial entre un nivel y el inmediato disminuye, obteniendo los mayores beneficios entre los consumos de 250 y 300 kg/m³. Este comportamiento se presenta con mayor claridad en el CPP, logrando, en los rangos de 300 a 350 kg/m³, una disminución es de 45%, sin embargo, al pasar de un consumo de 350 a 400 kg/m³ esta disminución se mantiene prácticamente igual, ganando apenas un 3% extra. Para el caso del CPO, los beneficios obtenidos con los diferentes consumos son más uniformes; en los rangos más bajos de consumo, el diferencial llega a ser del 25%, y va disminuyendo paulatinamente hasta llegar a 17% entre los consumos de 350 a 400 kg/m³ (Figura 6).

En cuanto al tipo de cemento, no existe una diferencia sustancial en los resultados, esto se debe a que actualmente en México, como en otros países, las adiciones de materiales puzolánicos o de relleno en los cementos son de uso frecuente. Esto abre la posibilidad de diseñar concretos con las mismas características de permeabilidad sin que el tipo de cemento tenga un impacto significativo, dejando al fabricante la posibilidad de utilizar el cemento de línea (Tabla 3).

3.2. Porosidad intrínseca en los áridos

Independientemente de la calidad de la pasta o de los materiales que la componen, habrá que tomar en cuenta la porosidad de los áridos gruesos que es imposible de modificar. Debido al volumen que ocupan en un diseño de mezcla, el comportamiento de la resistividad se verá modificado dependiendo de las características de cada roca (Tabla 4).

El conjunto de diseños de mezcla realizados para la investigación, se dividió en dos, partiendo del tipo de árido grueso utilizado. Se evaluaron áridos gruesos de andesita y caliza bajo las mismas condiciones de diseño, combinados con arena andesita.

Hay una clara tendencia a utilizar el árido de caliza antes que el de andesita (Figura 2), aunque existen

are the fundamental factor for the diminution of the permeability rate. Nevertheless, the influence of the coarse aggregate and the cement type continue conserving their tendencies and performance. Whereas for designs that do not contain SCA the differential is until 45%, depending on the cement and coarse aggregate type, the designs with high contents of SCA, this difference hardly gets to 20% (Figure 5).

c) Cement use variables

Is evident, that the cement amount increase the permeability rate diminishes considerably, obtaining reductions near to 50%. As the cement amount increases, the differential between a level and the following immediate one diminish, obtaining the greater benefits between the amounts 250 and 300 kg/m³. This behavior appears with greater clarity in the PPC (Portland Pozzolanic Cement), obtaining in the 300 to 350 kg/m³ diminution ranks of 45%, nevertheless, the analysis for 350 to 400 kg/m³ rate consumption shows that the diminution stays practically equal gaining as soon as a 3% extra. For the OPC (Ordinary Portland Cement) case, the benefits obtained with the different amounts there are more uniform, in the lowest amount rates, the differential gets to be from 25%, and is diminishing gradually until arriving at 17% between the amounts 350 to 400 kg/m³ (Figure 6).

Talking about the cement type, a substantial difference between the results thrown by the experiment does not exist. This is because in Mexico like another countries the filler or pozzolanic materials additions are frequently used. This opens the possibility to designing concrete with the same permeability characteristics where the cement type has not a significant impact leaving to the manufacturer the possibility to use their regular cement (Table 3).

3.2. Intrinsic porosity at the aggregates

Independently of the paste or employed materials quality must be observed the natural aggregates porosity that is impossible to change. Due to the volume that the aggregates occupy in a mix design, the resistivity behavior has been modify depend on the each rock characteristics (Table 4).

The mix designs set, made for this investigation was divided in two, depending on the coarse aggregate used. Andesitic and limestone aggregates were evaluated under the same design conditions, both types combined with andesitic sand.

A better performance it's clearly observed when the limestone aggregate is used than the andesitic one (Figure 2),

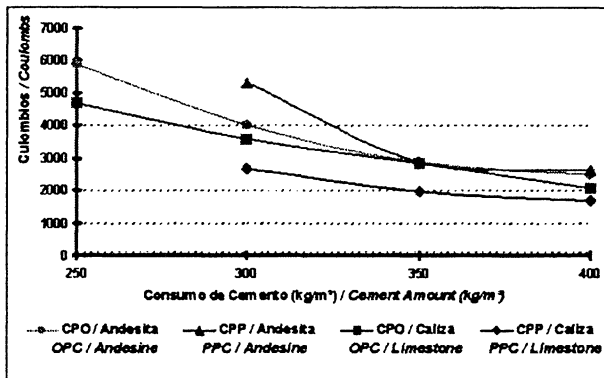


Figura 6.- Permeabilidad de acuerdo al tipo y consumo de cemento y al tipo de árido grueso.

Figure 6.- Cement type and amount and coarse aggregate type permeability.

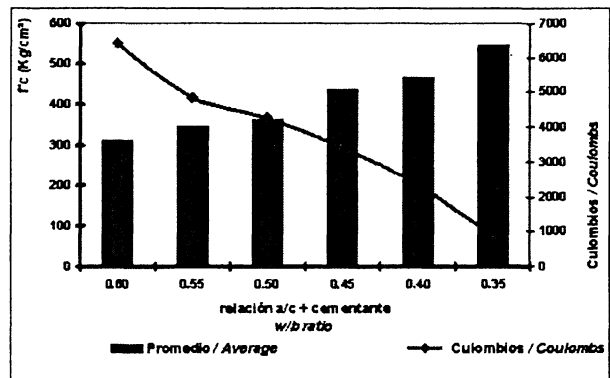


Figura 7.- Relación entre la resistencia a compresión y la permeabilidad.

Figure 7.- Compressive strength and permeability relation.

TABLA 3/TABLE 3

Análisis químico de los cementos Portland Puzolánico y Portland Ordinario
Ordinary and Pozzolanic Portland cements chemical analysis

Componente Component		Contenido (%) / Content (%)	
		CPO / OPC	CPP / PPC
SiO ₂	Dióxido de Sílice / Silice Dioxide	20.6	26.2
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio / Aluminium Oxide	5.0	3.2
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro / Ferrum Oxide	3.3	2.9
CaO	Óxido de Calcio / Calcium Oxide	64.3	56.6
MgO	Óxido de Magnesio / Magnesium Oxide	1.2	1.1
SO ₃	Anhidrido Sulfúrico / Anhidric Sulfure	2.93	2.87
Na ₂ O	Óxido de Sodio / Sodium Oxide	0.37	0.85
K ₂ O	Óxido de Potasio / Potassium Oxide	0.60	1.11
TiO ₂	Óxido de Titanio / Titanium Oxide	0.22	0.22
P ₂ O ₃	Peróxido de Fosforo / Fosforic Peroxid	0.09	0.06
Mn ₂ O ₃	Óxido de Magnesio / Magnesium Oxide	0.04	0.03
CaF ₂	Fluoruro de Calcio / Calcium Fluoride		
Cl ⁻	Cloro / Chloride		
CPO / OPC	Cemento Portland Ordinario / Ordinary Portland Cement		
CPP / PPC	Cemento Portland Puzolánico / Pozzolanic Portland Cement		

variaciones importantes dependiendo del rango de relación a/c. Las influencias del agregado grueso se acentúan para los rangos de 0,55 a 0,45, donde la apertura de la pasta es tal que la permeabilidad intrínseca del agregado marca la diferencia fundamental. A partir del punto 0,45 y conforme se disminuye la relación a/c, el diferencial de utilizar un agregado de mayor permeabilidad, va perdiendo fuerza por la propia densidad y cantidad de la pasta.

important variations exist depending of w/b ratio rank, but the performance is practically conserved for all the intervals. The coarse aggregate influences are accentuated for the ranks from 0.55 to 0.45, where the paste had an opening characteristics cause that intrinsic permeability of aggregate determines the fundamental difference. From 0.45 and decreasing the water amount, the differential of use a greater permeability aggregate lose force like consequence of the paste density.

TABLA 4/TABLE 4

Análisis de los áridos gruesos
Coarse aggregates chemical analysis

<i>Litología</i> <i>Lithology</i>	<i>Caliza</i> <i>Limestone</i>	<i>Andesita</i> <i>Andesine</i>
Porcentaje / <i>Percentage</i>	100%	100%
Color / <i>Colour</i>	Gris / <i>Gray</i>	Gris / <i>Gray</i>
Dureza / <i>Hardness</i>	3-4	5
Formas / <i>Shape</i>	Equidimensional, prismática y tabular <i>Equidimensional, prismatic and tabular</i>	Equidimensional, prismática y tabular <i>Equidimensional, prismatic and tabular</i>
Redondez / <i>Roundness</i>	Subangulosa a angulosa <i>Subangular to angular</i>	Subredondeada a subangulosa <i>Subrounded to subangular</i>
Textura superficial <i>Superficial texture</i>	Lisa / <i>Smooth</i>	Áspera / <i>Rough</i>
Sanidad / <i>Sanity</i>	Buena / <i>Good</i>	Buena a regular / <i>Good to regular</i>
Abrasión / <i>Abrasion</i>	27%	41%
Impacto / <i>Impact</i>	8%	14%
Densidad / <i>Density</i>	2.67	2.4
Absorción / <i>Absorption</i>	1.0%	4.5%
Calidad física / <i>Physical quality</i>	Buena / <i>Good</i>	Buena / <i>Good</i>
Calidad química / <i>Chemical quality</i>	Inofensiva / <i>Inocuous</i>	Inofensiva / <i>Inocuous</i>

3.3. La permeabilidad y la resistencia a compresión

La resistencia a compresión es inversamente proporcional a la permeabilidad, para los rangos manejados en este experimento, no existe detrimento alguno al ir aumentando la resistencia a compresión. Sin embargo, habrá que tomar en cuenta que cuando los incrementos de resistencias superiores a los 600 kg/cm², se logran principalmente con altos consumos de cemento, el calor de hidratación generado podría resultar en microfisuramientos (17) que incrementen la permeabilidad, haciendo que la relación deje de ser proporcional (Figura 7).

4. CONCLUSIONES

1. Conociendo la influencia individual y acumulada de cada factor del experimento, es posible combinarlos en diferentes calidades y cantidades para lograr permeabilidades similares, ya que los diseños de mezcla y sus componentes pueden depender de la

3.3. The permeability and compressive strength

The compressive strength is inversely proportional to the permeability, for the ranks handled in this experiment, does not exist any decrease when being increasing the compressive strength. Nevertheless will be necessary to take into account that when the compressive strength increases to values superior to 600 kg/cm², obtained mainly with high cement amounts, the generated hydration heat could be result in microcrackings (17) that increase the permeability, causing that the relation stops being proportional (Figure 7).

4. CONCLUSIONS

1. Knowing the individual and accumulated influence of each experiment factor; it is possible to combine them in different qualities and amounts to obtain similar permeability; this is because the mix designs and their components depend of the manufacturer local

disponibilidad local del fabricante. Al tener control sobre las variables de diseño de un hormigón, es posible evitar el sobre diseño, haciendo hormigones específicos para la permeabilidad deseada.

2. La relación a/c es la principal variable de afectación. En el experimento se determinó que a partir de relaciones a/c de 0,45 a 0,35, se logran permeabilidades aceptables para ambientes con diferentes concentraciones de cloruros. Está claro que conforme las tasas de ataque aumentan, la relación a/c deberá disminuir para equilibrar este ingreso de cloruros, esto es debido a la densificación que se logra con una hidratación más uniforme.

3. La influencia de los áridos gruesos, es otro factor relevante en la permeabilidad de los hormigones. Sin embargo, el efecto negativo de un árido poroso sólo es nocivo con relaciones a/c de 0,55 a 0,45, y es atenuado conforme la relación a/c disminuye, el consumo de cemento aumenta o se utilizan ACS. Para relaciones a/c de 0,60 o superiores, la propia abertura de la pasta anula el efecto, tanto negativo como positivo, que un árido puede causar.

4. El uso de ACS es determinante en el momento de diseñar un hormigón de baja permeabilidad. La adición de este tipo de materiales reduce la permeabilidad de un hormigón hasta en un 50% sin importar otro tipo de factores, incluso la relación a/c. Probablemente el punto más importante a destacar es el hecho de que el uso de ACS es capaz de cubrir las deficiencias que otros factores provocan en los hormigones.

5. En este experimento no se observó un comportamiento negativo o dudoso al emplear adiciones minerales en hormigones probados con la RCPT, muy por el contrario, estos hormigones presentaron los comportamientos más uniformes y estables, por lo que este método puede ser apto para este tipo de diseños.

6. El tipo y cantidad de cemento juegan un papel fundamental en la densificación de la pasta, se observó una disminución en la permeabilidad conforme el contenido de cemento aumenta. Para el caso del tipo de cemento, la influencia en la permeabilidad es mínima, además de ser atenuada por cualquier otro factor implícito en el diseño de mezcla, pero el diferencial mantiene al cemento CPP por delante en todos los análisis realizados.

7. Aunque la resistencia a compresión no es el objetivo principal de este artículo, debido a que es un factor de calidad obligado en los hormigones, se ha determinado que en resistencias a compresión desde 300 kg/cm² y

availability. Having control on the variables of concrete design, is possible to avoid the over design, doing specific concrete for the permeability wished.

2. The w/c o w/b ratio is the main variable to obtain it. The experiment determined that with w/c ratios from 0.45 to 0.35 could be obtained an acceptable permeability for environments with different chloride concentrations. It is clear that when the attack rates increase, the w/c ratio will have to diminish to balance the chloride velocity entrance.

3. The coarse aggregate influence, limestone and andesitic, is another important factor in the concrete permeability. Nevertheless, the negative effect of a porous aggregate just is injurious with w/c ratios from 0.55 to 0.45, and is attenuated if the mix design becomes more complex, that is to say, diminishing the w/c ratio, increasing the cement or SCA consumption. For w/c ratio 0.60 or superior ones, the own paste opening nullifies the negative or positive effect that an aggregate can cause.

4. The SCA use is important at the time of design a low permeability concrete. The addition of these materials reduces the concrete permeability until a 50% without concerning another factors, even the w/c ratio. Probably the most important point is that the moderate use of SCA, is able to cover deficiencies that other factors cause in the concrete.

5. In this study it was not observed a irregular behavior when SCA was used and tested with the RCPT, in other way, this kind of concretes presented the most uniform an stables behaviors, because this, the test method is able to use in this kind of mixes.

6. Obviously the type and amount of cement used in the concrete design have an important role in the paste densification. For the analyzed concrete, it was observed a permeability diminution when the cement amount increase, also the compressive strength has an increment. The cement type influence in the permeability is minimum, and is affected or modified by any other factor in the mix design, but, although this influence is small, the differential gives to the PPC the best performance in all the analyses made in combination with other factors.

7. The compressive strength is not the main object in this analysis, but is a basic quality factor of the concrete, for this reason it has determined that in compression resistances from 300 kg/cm² to 600 kg/cm², the chlorides

hasta 600 kg/cm², la permeabilidad a cloruros es inversamente proporcional al incremento de la resistencia, equiparando resultados puede decirse que los concretos con $f'c$ mayor a 500 kg/cm² tendrán permeabilidades menores a los 1.000 coulombs.

La evaluación y conocimiento preciso del empleo de los componentes de un diseño de mezcla en particular, permite al fabricante de concreto diversas alternativas de diseño para llegar a un mismo fin, dependiendo de la disponibilidad y calidades de los materiales de la zona. Lo que, a la larga, posibilita que cualquier alternativa viable pueda ser utilizada en diversos diseños que, finalmente, sean una garantía de durabilidad, funcionamiento y calidad del producto final, en cualquier condición a la que sean sometidos.

permeability is inversely proportional to the resistance increase, comparing results is conclude that concrete with $f'c$ greater to 500 kg/cm² will have permeability smaller than 1000 coulombs.

Finally, the evaluation and precise knowledge of the components performance in a mixture design, gives to the concrete manufacturer diverse design alternatives for the same goal, depending of the availability and material qualities at the zone. The advantage is that any alternative can be used in diverse designs with a guarantee of durability, operation and quality of the final product, without concerning the conditions that it is put under, and avoiding over design and unnecessary costs to the project final user.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Henry G. Russell, "Measuring Chloride Penetration Resistance", Concrete Products, February 2001
- (2) Sue Lane. "Thoughts on the Rapid Chloride Permeability Test" Eastern Resource Center, Federal Highway Administration, may 2000.
- (3) B. Martínez. R. Uribe, "Grado de Precisión de la Prueba de Permeabilidad Rápida a Cloruros" Reporte Interno, Centro de Tecnología Cemento y Concreto, CEMEX México, noviembre 2002.
- (4) P. Joshi, C. Chan: "Rapid Chloride Permeability Testing" Concrete Construction, Page 37, Hanley-Wood Publication, december 2002.
- (5) T. H. Wee, A. K. Suryavanshi, adn S. S. Tin, "Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) Results for Concrete Containing Mineral Admixtures" ACI Material Journal, page 221, Vol. 97 No. 2, march-april 2000.
- (6) Caijun. Shi, Julia. A. Stegemann and Robert J. Cadwell, "Effect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its Implications on the Rapid Chloride Pemeability Test" ACI Material Journal, page 389, Vol. 95 No. 4, july-august 1998.
- (7) Henry G. Russell, "The Rapid Chloride Permeability Test" IIPC International Symposium, november-december 2000, <http://hpc.fhwa.dot.gov>
- (8) R. Uribe, I. W. Ruiz, "Informe de Atención a la Reclamación de los Concretos del Puente Sobre el Río Bayamón" Reporte Interno, Centro de Tecnología Cemento y Concreto, CEMEX México / Puerto Rico, noviembre 2002.
- (9) S. Saini, S. S. Dhuri, D. K. Kanhere, S. S. Momin, "High Performance Concrete for a Urban Viaduct in Mumbai"
- (10) B. Martínez, "Análisis de la Disminución de la Permeabilidad de Hormigones Recubiertos con Resinas Epóxicas de dos Componentes" Reporte Interno, Centro de Tecnología Cemento y Concreto, CEMEX México, agosto 2002.
- (11) Roberto Uribe et al "Proyecto de Concretos de Baja Permeabilidad" Reporte Interno, Centro de Tecnología Cemento y Concreto, CEMEX México, noviembre 2002.
- (12) Hussain and Rasheeduzzafar. "Corrosion Resístanse of Fly Ash" ACI Material Journal, page 264, Vol. 91 No. 3, may-june, 1994.
- (13) ASTM C 1202: "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"; Annual Book of ASTM Standards: Section 4. Volume 4.02 Concrete and Aggregates; PA. EUA 1998.
- (14) Matthew A. Miltenberger. "Variability in the AASHTO T-277 Test Method Caused by Instrumentation", Mastes builder Inc., diciembre.1997
- (15) C. Ozyildirim "Investigation of Concrete Containing Condensed Silica Fume": Report No. FHWA/VA-86-R25, Virginia Highway and Transportation Research Council, Charlottesville, january, 1986.
- 16) D. Withing, A. Walitt. "Permeability of Concrete": American Concrete Institute, SP-108; Detroit Mich. 1988.
- (17) Comisión Federal de Electricidad / Instituto de Ingeniería de la UNAM: "Manual de Tecnología" del Concreto"; Sección 3, Concreto en Estado Endurecido; Limusa, México. 1997.
- (18) American Association of State Highway and Transportation Officials: "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing" Fourteen Edition; Washington, D.C., 1986
- (19) M. Mena-Ferrer, A. Graf-López, L. García-Chowell, C. Gómez-Toledo, R. Uribe-Alfí: "Guía para la Durabilidad del Concreto" Suplemento Mexicano del Informe del Comité del ACI 201; Sección México Centro y Sur de México; abril de 1996
- (20) A. Bentur, S. Diamond y N. S. Berke: "Steel Corrosion in Concrete": Fundamentals and Civil Engineering Practice: Modern Concrete Technology 6; E & FN Spon; London, Eng., 1992.

* * *

Publicación del Instituto Eduardo Torroja-CSIC

Razón y Ser de los tipos estructurales alcanza en la Colección «Textos Universitarios» su séptima edición. Las anteriores fueron publicadas sucesivamente por el Consejo Superior de

Investigaciones Científicas a través del Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo Torroja», que lleva el nombre de su autor. El prestigio internacional de Eduardo Torroja Miret

dentro de la Ingeniería como creador e innovador en el campo de las estructuras, es bien conocido. Esta capacidad excepcional de creación, interpretación e innovación queda perfectamente reflejada en este libro.

*Obra fundamental de notable contenido formativo y didáctico para los estudiantes y estudiosos de la Arquitectura y la Ingeniería, **Razón y Ser** mantiene, a pesar del tiempo transcurrido desde su edición original, plena vigencia.*

Este hecho y la demanda continua de ejemplares, dentro y fuera de España, nos ha animado a su reedición en una colección que como «Textos Universitarios» se plantea llevar a sus lectores obras fundamentales de permanente demanda, y nuevas aportaciones igualmente importantes tanto por la novedad de sus contenidos, como por la solidez y actualidad de los mismos.

*Finalmente, esta nueva edición de **Razón y Ser** mejora, a nuestro juicio, la calidad editorial y presentación de las anteriores, y esperamos obtenga la misma acogida de las que la precedieron.*

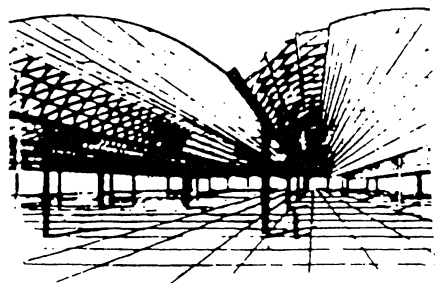
Madrid, octubre 1991

TEXTOS UNIVERSITARIOS

EDUARDO TORROJA MIRET

RAZON Y SER

DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES



Consejo Superior de Investigaciones Científicas