

# PERMEABILIDAD, A GASES, DE HORMIGONES PARA DEPOSITOS DE RESIDUOS RADIOACTIVOS

Miyake, E.T., Rzyksi, B.A.(\*)

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
São Paulo, SP  
Brasil

## Resumen.

El proyecto, para la instalación del primer depósito superficial para residuos radioactivos en Brasil, incluye el estudio de la durabilidad del hormigón como barrera de ingeniería. Uno de los parámetros más importantes, por medio del cual se puede garantizar una durabilidad mayor de los concretos, es la permeabilidad. La degradación del concreto depende, en gran parte, del movimiento de los fluidos que es proporcional a la permeabilidad. Estos fluidos podrán introducir agentes corrosivos y también lixiviar elementos radioactivos del depósito. Para determinar la permeabilidad del hormigón fué construída una cámara y usado gas nitrógeno que es inerte a las especies químicas del hormigón. Fueron analizados hormigones con diferentes relaciones agua-cemento y varios tiempos de cura.

## Abstract.

The project to install the first Brazilian shallow ground radwaste repository, include durability studies of concrete as an engineered barrier. One of the most important parameters, through which it is possible to guarantee a better durability of concretes, is permeability. The degradation of the concretes depends to a large extent on the rate of fluids movement, proportional to the permeability, which could introduce corrosive agents and also leach radioactive elements from the repository. To determine the permeability of concrete a gas camera was constructed and nitrogen was used as a permeation fluid, inert to the concrete chemical species. Concretes with different water-cement ratios were tested, as well with different curing times.

## 1. Introducción.

El programa de estudios para predecir la durabilidad del hormigón, necesaria para la construcción del depósito para residuos radioactivos en Brasil, empezó en 1987, en el Instituto de Pesquisas Energéticas y Nucleares, São Paulo. El objetivo principal es obtener datos para la mejor composición de hormigones a partir de cementos Portland comunes o especiales, y que puedan resistir, en ambientes agresivos, por períodos de tiempo muy

extensos.

La predicción de la durabilidad incluye la selección correcta de los parámetros determinísticos y entre estos parámetros está la permeabilidad.

Los cambios químicos en hormigones dependen de la permeabilidad de las especies reactivas presentes en su interior y comprenden muchos mecanismos de transporte, diferentes entre sí. La permeabilidad de los hormigones, que son materiales porosos, puede ser causadora, si muy grande, de

su degradación. Cuanto más impermeable es el hormigón, menores son las posibilidades del movimiento de los líquidos en su interior. Estos líquidos pueden lixiviar el hidróxido de calcio de la estructura y permitir la agresión a la armadura. Como barrera de ingeniería, en depósitos para residuos radioactivos, hormigones más permeables pueden propiciar la lixiviación de los elementos radioactivos para el medio ambiente.

Una de las formas de determinar el valor de la permeabilidad es usar gases como fluidos. Normalmente los hormigones utilizados en la construcción de diques, donde hay mayor contacto con el agua, tienen permeabilidad del orden de  $10^{-13}$  m<sup>2</sup>, pero cuando se trata de hormigones usados para depósitos de residuos radioactivos los valores deben ser más bajos, del orden de  $10^{-18}$  a  $10^{-13}$  m<sup>2</sup>.

El trabajo del grupo consistió en la construcción de la cámara de permeabilidad por la cual se hace pasar el nitrógeno, el montaje del sistema de medición y la obtención de los valores de la constante de permeabilidad, en diversas composiciones de hormigón.

Este estudio muestra una parte de los valores del coeficiente de permeabilidad obtenidos en hormigones preparados con cemento Portland común, con diversas relaciones agua-cemento y varios tiempos de cura.

## 2. Parte Experimental.

### 2.1. Sistema de Medición de la Permeabilidad a Gases.

El cuerpo que compone la cámara de permeabilidad tiene forma cilíndrica y es formado por tres partes en acero inoxidable: un anillo lateral (a) que es ajustado a la muestra por intermedio de un tornillo y dos topes, un superior (b) y un inferior (c), Figura 1. En el tope superior esta conectada la entrada del gas, y existen una válvula de depresión y el transductor de presión. En el tope inferior un orificio, en la parte central, permite la salida del gas que pasó por el cuerpo, para el medio ambiente. Esta cámara es semejante a la desarrollada en Francia<sup>(1)</sup>.

La muestra de hormigón, de forma cilíndrica, tiene aislada su superficie lateral con un anillo de caucho sintético, para que el flujo de gas tenga solamente la dirección perpendicular a la sección transversal

del cuerpo.

La cámara de permeabilidad fue proyectada para trabajar con presiones entre 0 y 15 bar. La presión usada en los experimentos fué de 10 bar.

La cámara se conecta al depósito de nitrógeno y el transductor de presión a un amplificador de señal y éste al registrador gráfico donde se obtiene la curva de decaimiento del gradiente de presión en función del tiempo, Figura 2.

Las condiciones ambientales del laboratorio donde está ubicado el sistema de medición son bien controladas. La temperatura es mantenida entre 20 y 24°C y la humedad relativa del aire entre 60 y 70 por ciento.

### 2.2. Especímenes.

Los especímenes de hormigón fueron confeccionados con cemento Portland común, pedregullos de diámetros hasta 19 mm, arena mediana y agua filtrada.

Las relaciones agua-cemento, en masa, variaron entre 0,40 y 0,70. El contenido de cemento en las mezclas fué de 450, 350 y 250 kg/m<sup>3</sup>.

Los cuerpos cilíndricos de hormigón fueron preparados en moldes con 150 mm de diámetro por 50 mm de altura. Después de 24 horas fueron desmoldados y mantenidos en cura húmeda por 30, 60 y 90 días, a temperatura de  $23 \pm 2$  C.

Los especímenes, antes de su introducción en la celda de permeabilidad, fueron secados en estufa a  $100 \pm 5$  C durante algunas horas para la eliminación del agua contenida en sus poros.

### 2.3. Medición de la Permeabilidad.

Después de ubicar la muestra en la celda y cerrar la cámara, el nitrógeno es insuflado con una presión de 10 bar hasta que se alcance la estabilidad de pasaje del gas por los poros del hormigón.

El tiempo medio para alcanzar un régimen estable es de aproximadamente 10 minutos. Después de la estabilización la introducción del gas en la celda es interrumpida. La disminución de la presión es registrada en función del tiempo y de la curva se obtienen los valores del coeficiente de permeabilidad.

La permeabilidad es definida como una propiedad que indica la mayor o menor facilidad de movimiento de un fluido a través de un material poroso.

Considerando un elemento de superficie  $A$  ( $m^2$ ), perpendicular a la dirección de insuflación del gas con presión  $P$  ( $N/m^2$ ), el flujo está dado por la ley de Darcy(2) por la ecuación:

$$Q = \frac{KA}{\eta} \cdot \frac{dP}{dl}$$

donde  $K$  es el coeficiente de permeabilidad ( $m^2$ ), la viscosidad del gas ( $\eta$ ) y considerada para el nitrógeno  $1,75 \times 10^{-5}$   $Ns/m^2$  y  $l$  la altura de la muestra ( $m$ ).

Las hipótesis que permiten calcular el valor de  $K$  de la curva experimental de la presión  $P$  en el permeámetro, en función del tiempo  $t$  son:

- el régimen del movimiento del gas en la celda es del tipo laminar;
- el pasaje del gas es isotérmico;
- el gas utilizado es perfecto.

Las últimas dos hipótesis permiten calcular el flujo  $Q$ , considerando una presión media  $(P + P_0)/2$ :

$$Q = \frac{2V}{P+P_0} \cdot \frac{dP}{dt}$$

donde  $Q$  es el flujo del gas mantenido a una presión media  $(P + P_0)/2$  ( $Q$  en  $m^3/s$ ,  $P$  y  $P_0$  en  $Pa$ ),  $V$  el volumen disponible en la celda en el tope superior ( $m^3$ ),  $P$  la presión aplicada ( $bar$ ),  $P_0$  la presión atmosférica en el momento del ensayo ( $bar$ ) y  $dP/dt$  la inclinación de la curva  $P=f(t)$  ( $Pa/s$ ).

Integrando la ecuación que representa la ley de Darcy para la altura y superficie de la muestra, se obtiene:

$$Q = \frac{KA}{\eta l} \cdot P - P_0$$

que escrito en función de  $K$  será:

$$K = \frac{Q l \eta}{A (P - P_0)}$$

La unidad que expresa el valor de  $K$  es el  $m^2$  o el Darcy,  $D$ , ( $10^{-12} m^2$ ). El error promedio en las mediciones de tres muestras iguales, de la misma mezcla de cemento, y para los valores obtenidos para una misma muestra, fué del orden de 5 por ciento.

### 3. Resultados y Discusión.

La Tabla I muestra los valores promedio del coeficiente de permeabilidad, obtenidos con tres muestras confeccionadas con la misma formulación, para cada ensayo. Los resultados son dados para diferentes relaciones agua-cemento y diversos tiempos de cura.

Fueron analizadas también muestras preparadas solamente con pastas y el valor de la constante  $K$  por ejemplo para una relación agua-cemento igual a 0,50 y tiempo de cura de 90 días, es aproximadamente de  $6 \times 10^{-19} m^2$  y en mezclas de argamasa, para las mismas condiciones, de  $10^{-17} m^2$ .

La resistencia mecánica de hormigones confeccionados con parte de las mismas mezclas usadas para medir la permeabilidad está dada en la Tabla II.

La necesidad de construir depósitos para residuos radioactivos con estabilidad química y física que alcance los 500 años, resultó en la necesidad de realizar el análisis de procesos importantes y estudios de la cinética de los mecanismos que afectan la durabilidad. La mayor parte de las estructuras hidráulicas puede ser proyectada en función de su permeabilidad dependiendo de la aplicación. La penetración de los gases y del agua en hormigones es el factor más importante del desarrollo del proceso de deterioración. La penetración del agua en la estructura del hormigón depende de su permeabilidad y su coeficiente es un factor importante en la estructura.

La medición de la permeabilidad es relativamente fácil cuando realizada con el sistema desarrollado durante las investigaciones.

**Tabla I. Valores promedio del coeficiente de permeabilidad, K, en concretos producidos con cemento Portland común.**

Relación agua-cemento	Tiempo de Cura (días)	Coeficiente de Permeabilidad K (m <sup>2</sup> )
0,40	30	2,29 x 10 <sup>-13</sup>
	60	2,23 x 10 <sup>-13</sup>
	90	2,16 x 10 <sup>-13</sup>
0,50	30	7,94 x 10 <sup>-13</sup>
	60	5,33 x 10 <sup>-13</sup>
	90	2,31 x 10 <sup>-13</sup>
0,70	30	4,32 x 10 <sup>-13</sup>
	60	4,30 x 10 <sup>-13</sup>
	90	2,04 x 10 <sup>-13</sup>

**Tabla II. Resistencia mecánica de hormigones producidos con cemento Portland común.**

Relación agua-cemento	Tiempo de Cura (días)	Resistencia Mecánica (MPa)
0,40	30	55,5
	60	61,7
	90	63,4
0,50	30	41,7
	60	49,0
	90	49,8
0,70	30	19,3
	60	22,2
	90	23,5

Fué observado que las mezclas de bajo contenido de cemento, tienen su permeabilidad disminuida y así ocurre con las mezclas con relación agua-cemento alta. Cuando la relación agua-cemento es mayor que 0,50 la permeabilidad aumenta sensiblemente porque la porosidad capilar es mayor.

Los datos del coeficiente de permeabilidad al nitrógeno son sensibles para pequeños cambios del tipo de mezcla y grado de cura, permitiendo creer que los valores pueden indicar la calidad del hormigón.

Están planeadas otras mediciones para aumentar la reproducibilidad de la técnica.

No existe un valor crítico para la constante de permeabilidad en depósitos para residuos radioactivos, pero los ensayos preliminares muestran que debe darse atención especial para algunos detalles cuando son preparadas las mezclas:

- la relación agua-cemento;
- el contenido de cemento;

- la homogeneidad del hormigón;
- el tiempo de cura, y
- la necesidad de usar agregados especiales (microsílica, pozolanas, etc)

Los experimentos con otros tipos de cementos y otras formulaciones están siendo realizados. Están planeadas composiciones con reductores de la permeabilidad.

#### 4. Referencias Bibliográficas.

- (1) JAMET, P.M., DUBOIS, F. Mesure de la perméabilité a l'azote du beton, STA/LBR/81 - DT 553/PHJ-AB Centre d'Etude Nucleaire de Saclay, 1981.
- (2) COLLINS, R.E. Flow of fluids through porous materials, Reinhold Pub. Co., New York, 1960.

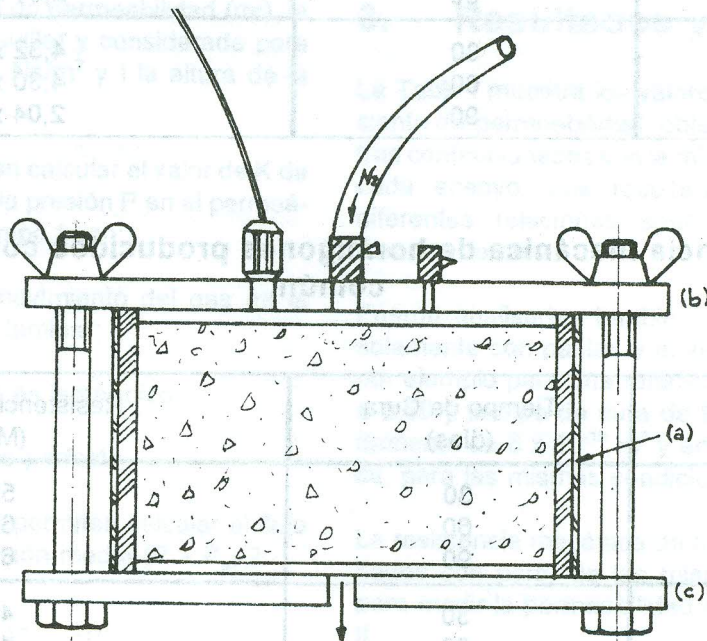


FIG.1

Cámara de permeabilidad a gases

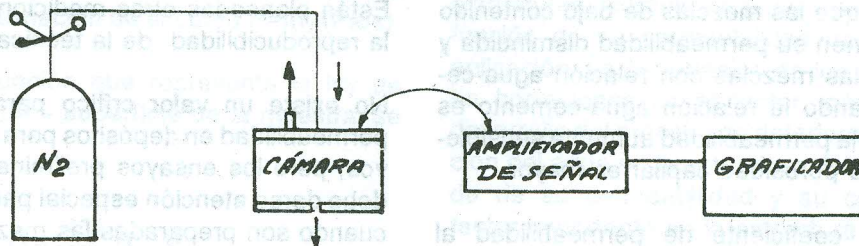


FIG.2

Sistema de medición de permeabilidad a gases