



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

POROSIDAD DEL CONCRETO

Juan Orlando López Orozco

Asesorado por Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, enero de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

POROSIDAD DEL CONCRETO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN ORLANDO LÓPEZ OROZCO

ASESORADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑONEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amaham Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

POROSIDAD DEL CONCRETO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 04 de septiembre de 2003.

Juan Orlando López Orozco

DEDICADO A:

Él que no se ve,
Él que no se oye,
pero a **ÉI, ÉI y ÉI**
sea dedicado este trabajo.

RECONOCIMIENTOS A

Ing. Francisco Javier Quiñónez

Ing. Francisco Ecuté

Centro de Investigaciones de Ingeniería –CII-

Ing. Julio Luna Aroche

Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas –CESEM-

Ministerio de Energía y Minas

Ing. Víctor Manuel Sánchez

Ing. Estuardo Palencia

Mezcladora S.A.

Mil gracias por el apoyo en la realización de este trabajo

AGRADECIMIENTOS A

- Mis padres Luis Orlando y Dora Marina por el apoyo brindado hasta este momento, ¡¡Dios lo sabrá recompensar!!.
- Mis hermanas y sobrinos Marielos, Gladis y Paty, Adrián Antonio, Juan Carlos y Juan Diego gracias por el amor que me han dado
- Mi abuelita, tíos y primos No me alcanzaría el papel para recordarlos a todos, y recordar todo lo que me han ayudado, Dios les bendiga.
- Mis abuelitos y mi tía Juan Gilberto López, Francisco Orozco, Paula Miranda Gilma Georgina López
Que Dios los tenga en un descanso eterno.
- Mi novia Selene, gracias por el amor que me has dado.
- Mis amigos, y compañeros Muy especialmente al Ing. Oscar Montes, al Ing. Arturo Samayoa, a la Inga. Glenda García muchas gracias por sus sabios consejos. También a los Ings. Renaldo Girón, Carlos Garrido, Pablo Zúñiga, Jesús Martínez, Douglas Román, Helen Ramírez y todo el Depto. de Matemática, a José Tuna, Tatiana Maldonado, Juan Pablo Oliva, Liliana Juárez, Luisa Ax, David Hernández y Julia Álvarez, gracias por la amistad, compañerismo y aprecio brindado. Al Lic. Rodolfo de León, su familia y el grupo Misión Amor muchas gracias por el apoyo que me brindaron desde que los conocí, ¡¡muchas Bendiciones!!
- y a Dios Que muchas veces figura ser el último como en esta ocasión, pero sin su ayuda nada de lo que soy sería, ¡¡¡gracias, gracias y gracias!!!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	v
GLOSARIO	vii
RESUMEN	ix
OBJETIVOS	xi
INTRODUCCIÓN	xiii

PRIMERA PARTE: MARCO TEÓRICO

1. POROSIDAD DEL CONCRETO	
1.1 ¿Qué es la porosidad del concreto?	01
1.2 Permeabilidad y hermetismo del concreto	02
1.3 Tipos de poros que se encuentran en el concreto	03
1.4 Técnicas para medir la porosidad	06
1.4.1 Adsorción del vapor de gas	07
1.4.2 Observación directa (por microscopio)	07
1.4.3 Porosímetro de intrusión de mercurio	09
1.4.3.1 Correcciones para los datos de volumen	12
1.4.3.1.1 Correcciones principales por expansión de maquinaria y compresión de mercurio	12
1.4.3.1.2 Compresión diferencial del mercurio	13
1.4.3.1.3 Compresión de la muestra	14
1.4.3.1.4 Correcciones adicionales de volumen	15
1.4.3.2 Correcciones para los datos de presión	16

1.4.3.3	Valores de ángulo de contacto y la tensión de superficie	16
1.4.3.4	Forma del poro	17
1.4.3.5	Cambio en la tensión de superficie con el tamaño del poro	19
1.5	Modelos para la distribución del tamaño del poro en cementos	20
1.6	Modelos para la permeabilidad del cemento y concretos	22
1.6.1	Modelos empíricos	22
1.6.2	Modelos de redes	24
1.6.3	Modelos basados en la teoría de la filtración	27
2.	EFFECTOS DE LA POROSIDAD EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO	
2.1	La resistencia del concreto	33
2.2	Relación entre resistencia y porosidad	34
2.2.1	¿Cómo se relaciona la resistencia y la porosidad?	35
2.3	Efectos de la porosidad en la resistencia a la compresión	38
2.4	Efectos de la porosidad en el modo de falla del concreto	39
3.	EFFECTOS DE LA POROSIDAD EN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO	
3.1	¿Qué es la durabilidad del concreto?	41
3.2	Influencia del sistema de poros en la durabilidad	42
3.3	Transporte de fluidos en el concreto	44
3.4	Relación entre porosidad y permeabilidad	42
3.5	Absorción del concreto	45
3.5.1	Pruebas de absorción superficial	45
3.6	Permeabilidad al agua del concreto	47
3.6.1	Pruebas de permeabilidad	54

3.6.1.2 Coeficiente de permeabilidad	55
3.6.2 Prueba de penetración de agua	57

SEGUNDA PARTE: MARCO EXPERIMENTAL

4. ENSAYOS A REALIZAR

4.1 Descripción del trabajo experimental	59
4.2 Ensayos realizados	59
4.3 Caracterización física de los agregados	60
4.3.1 Pruebas	60
4.4 Diseño de mezclas	61
4.5 Elaboración de muestras	62
4.6 Ensayo de muestras	62
4.6.1 Ensayo a compresión	63
4.6.2 Ensayo de absorción	63
4.6.3 Ensayo de observación directa	63

5. RESULTADO DE LOS ENSAYOS

5.1 Ensayo de agregados	65
5.2 Resultados de la mezcla fresca	66
5.3 Resultado de ensayos a compresión	67
5.4 Resultado del ensayo de absorción	69
5.5 Resultado del ensayo de observación	70

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de resultados del concreto fresco y resistencia a compresión	71
6.2 Análisis de resultados del ensayo de absorción	73

6.3	Análisis de resultados de la observación directa en microscopio	76
6.4	Limitantes de los ensayos	79
	CONCLUSIONES	81
	RECOMENDACIONES	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	BIBLIOGRAFÍA	84
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Datos de porosidad vrs. volumen de intrusión de mercurio	10
2	Porcentaje de porosidad vrs. diámetro del poro	10
3	Elemento de una red de poros, en donde los tamaños del poro pueden ser muy variados	25
4	Elemento de una red de poros, en donde los tamaños del poro pueden ser muy variados en forma de red	29
5	Relación porosidad-resistencia en cementos curados de varias formas	36
6	Morteros de cemento portland con diferentes proporciones de mezcla	37
7	Forma típica de falla del concreto a compresión	40
8	Relación entre permeabilidad y porosidad capilar de la pasta de cemento	49
9	Relación entre permeabilidad y relación A/C para pastas de cemento maduras (93% de cemento hidratado)	52
10	Relación agua/cemento A/C vrs. asentamiento	72
11	Relación agua/cemento A/C vrs. resistencia a compresión	73
12	Relación agua/cemento A/C vrs. porcentaje de vacíos	74
13	Resistencia a compresión vrs. porcentaje de vacíos	75
14	Asentamiento vrs. porcentaje de vacíos	76
15	Relación agua/cemento A/C vrs. núm. poros	77
16	Resistencia a compresión vrs. núm. poros	78
17	Curva granulométrica del agregado fino	85

18	Curva granulométrica del piedrín de 3/8"	86
19	Curva granulométrica del piedrín de 1"	87

TABLAS

I	Valores de compresibilidad para varios materiales	15
II	Factores de forma del poro	18
III	Comparación de permeabilidades de rocas y pastas de cemento	49
IV	Reducción de permeabilidad de la pasta de cemento (relación a/c = 0.7) con el desarrollo de la hidratación	51
V	Porcentaje de humedad de los agregados	65
VI	Resultados del análisis de agregados	66
VII	Relaciones agua/cemento (A/C) y proporciones de mezclas	66
VIII	Datos de las pruebas de las mezclas frescas	67
IX	Datos de los ensayos a compresión	67
X	Datos de ensayos por absorción	69
XI	Datos de ensayos de observación en microscopio	70

GLOSARIO

Absorción	Proceso por el cual un líquido es arrastrado dentro de un cuerpo sólido poroso y tiende a llenar los poros permeables del mismo; también se conoce así al aumento en la masa de un cuerpo sólido poroso resultante de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables.
Acción capilar	Fenómeno de un cuerpo sólido de atraer y hacer subir por sus paredes, hasta cierto límite, el líquido que las moja, como el agua, y de repeler y formar en su alrededor un hueco o vacío con el líquido que no las moja, como el mercurio.
Exudación	Flujo natural de una parte del agua utilizada en la mezcla de hormigón o mortero fresco, debido al asentamiento de los materiales sólidos dentro de la masa, también llamado ganancia de agua.
Flujo	Fluido que atraviesa un medio poroso por medio de los poros entrecruzados que también se le llama sistema de poros.
Matriz de pasta	Zona o parte del concreto que está compuesto únicamente por pasta de cemento hidratado.

Micro-metro	Unidad de longitud que equivale a la millonésima parte del metro ($1 \cdot 10^{-6}$) y se representa así: “ μm ”.
Nano-metro	Unidad de longitud que equivale a la milmillonésima parte del metro ($1 \cdot 10^{-9}$) y se representa así: “ nm ”.
Permeabilidad	Acción de un material que puede ser penetrado por agua o cualquier otro fluido.
Pico-metro	Unidad de longitud equivalente a la millonésima parte del metro ($1 \cdot 10^{-12}$).
Polímero	Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.
Poros de aire	Espacio en la pasta de cemento, mortero u hormigón, lleno con aire u otro gas.
Segregación	En el concreto es el acto en el que los materiales por su densidad buscan su lugar, los más densos como el pedrín bajan y los más livianos como el agua flotan.
Zona de interfase	Zona de transición entre el agregado y la matriz de pasta de cemento.

RESUMEN

La porosidad es una característica importante del concreto y de ésta dependen en parte otras características como la resistencia a la compresión y la durabilidad. La resistencia a la compresión se sabe que es el dato más relevante para diseñar. La durabilidad se debe de tomar en cuenta porque de esto depende cuanto tardará la obra que se está realizando en buenas condiciones. Durante este trabajo se desarrollarán más a fondo estos temas.

Los métodos que existen para poder medir la porosidad (medida en porcentaje) son descritos, entre ellos se encuentra la adsorción de vapor de gas, la observación por microscopio y la técnica más importante que es la porosimetría de intrusión de mercurio.

En la parte experimental se diseñaron mezclas con diferentes relaciones de agua/cemento (A/C) para ver la variación de la porosidad con respecto a la relación A/C, y también cómo variaba en función de la resistencia a la compresión.

Se hicieron dos pruebas, una por observación en microscopio y una por absorción de agua para poder tener un índice de la porosidad que tenían los concretos. Además se hizo un análisis con gráficas para mostrar como se relacionaban el porcentaje de vacíos con el asentamiento inicial, resistencia a compresión y relación agua/cemento.

OBJETIVOS

- **Generales**

1. Elaborar un trabajo de investigación que sirva como instrumento de consulta para estudiantes universitarios, profesionales y toda persona que esté interesada en la porosidad del concreto.
2. Colaborar con la investigación al respecto de la porosidad del concreto en Guatemala y su importancia.

- **Específicos**

1. Elaborar un marco teórico sobre la porosidad del concreto y los efectos que tiene en la durabilidad y la resistencia.
2. Conocer los ensayos que existen para calcular la porosidad, sus ventajas, desventajas y limitaciones.
3. Estudiar las normas y métodos que se pueden utilizar para calcular la porosidad y otros factores relacionados íntimamente con la porosidad como lo es la absorción.
4. Elaborar ensayos descritos por normas conocidas para encontrar una indicación de la porosidad utilizando materiales del país, específicamente del Depto. de Guatemala.

INTRODUCCIÓN

El concreto es el elemento más utilizado en la construcción, no sólo en Guatemala, sino en todo el mundo, por ello que existe una amplia gama de estudios en relación al mismo. Los estudios más importantes han profundizado en poder alcanzar grandes resistencias a compresión.

Dentro de las características del concreto se encuentra la porosidad, es importante por los efectos que puede ocasionar. Un solo poro aislado no produciría ningún efecto, pero en el concreto, que es un material poroso, no es un solo poro, sino una infinidad de poros de distintos tamaños conectados entre sí para formar series o redes, a través de las cuales puede circular cualquier fluido. Esto hace que las características iniciales del concreto puedan ser alteradas a través del tiempo, la porosidad es un factor que depende básicamente de la relación agua/cemento (A/C).

Existen estudios al respecto de cómo poder calcular la porosidad, entre ellos se encontraron la absorción de gas, la observación directa por microscopio que contiene varios métodos y la porosimetría de intrusión de mercurio que es el más utilizado hasta ahora, y del que se desprenden otros estudios al respecto.

La porosidad tiene efectos muy notables en dos características muy importantes del concreto: la resistencia a compresión y la durabilidad. En ambas características se nota una relación inversa fundamentalmente con la porosidad.

La resistencia a compresión depende de la relación A/C pero la porosidad colabora en parte, además, la falla del concreto a compresión se ve ligada a la porosidad. La durabilidad es fuertemente amenazada por el agua que fluye a través de los sistemas de poros, que bien puede ir pura o llevar sustancias agresivas al concreto y podrían alterar las características iniciales del mismo hasta llevarlo a su destrucción con el tiempo.

Desafortunadamente, en Guatemala no existe equipo para realizar experimentos de intrusión de mercurio, debido a que la demanda de este ensayo es poca y muy costosa, es necesario recurrir a otros ensayos como el que define la norma ASTM C-642-97 para averiguar la indicación de la porosidad del concreto.

1. POROSIDAD DEL CONCRETO

1.1 ¿Qué es la porosidad del concreto?

El diccionario “*Webster’s New World Dictionary*” define la porosidad como “estar llena de poros, o pequeños agujeros, a través de los cuales pueden pasar los fluidos, la luz, y/o el aire”¹.

Normalmente el concreto es una mezcla de cuatro ingredientes básicos: arena, grava, cemento y agua. En el proceso de mezcla, una cierta cantidad de aire se mezcla en el concreto. El agua y el aire toman espacio dentro del concreto aún después que el concreto es derramado en el lugar y durante las primeras etapas del fraguado.

Cuando el concreto es trabajado en su lugar y empieza a cuajarse o endurecerse, los ingredientes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras los ingredientes más livianos flotan arriba. Siendo el agua el más liviano de los cuatro ingredientes básicos, flota hacia arriba donde se evapora o se exprime por los lados o el fondo. Según se exprime se mueve en todas direcciones. El agua, al ocupar espacio, deja millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Según el aire escapa, tiene el mismo efecto.

Estos espacios huecos se atan entre sí creando lo que se llama porosidad. Frecuentemente los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del concreto, debilitándolo.

La acción capilar del concreto hace que fluya agua, o la lluvia golpea los lados de la pared de concreto, o la hidrología del agua va contra la pared de un sótano, el agua viaja por los poros a través del concreto.

Los poros están entretnejidos y entre conectados, permitiendo así el pasaje lento del agua a través del concreto. Mientras más denso el concreto, más apretados los poros y menos agua puede pasar a través.

La estructura de la porosidad en el concreto influye fuertemente en el actuar del mismo. Específicamente, la porosidad determina las proporciones a que las especies agresivas pueden entrar en la masa y causar destrucción. Los índices de la intrusión se relacionan con la permeabilidad del concreto. De la manera más general, la permeabilidad depende de la forma en que la porosidad total es distribuida. La porosidad, a su vez, se relaciona a la reacción original del cemento, las mezclas minerales, y las partículas de agregados, la relación de agua-sólidos, y las condiciones de curado entre otras.

1.2 Permeabilidad y hermeticidad del concreto

El concreto empleado en estructuras que retengan agua o que estén expuestas a mal tiempo o a otras condiciones de exposiciones severas debe ser virtualmente impermeable y hermético. La hermeticidad se define a menudo como la capacidad del concreto de refrenar o retener el agua sin escapes visibles. La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gras, iones, etc.). Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven hermético.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a la restauración, al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ion cloruro.

La permeabilidad también afecta la capacidad de destrucción por congelación en condiciones de saturación. Aquí la permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque la pasta recubre a todos los constituyentes del concreto. La permeabilidad de la pasta depende de la relación agua-cemento y del grado de hidratación del cemento o duración del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere una relación agua-cemento baja y un período húmedo adecuado. La inclusión de aire ayuda a la hermeticidad aunque tiene un efecto mínimo sobre la permeabilidad, aumenta con el secado.

Las relaciones agua-cemento bajas también reducen la segregación y el sangrado, contribuyendo adicionalmente a la hermeticidad. Para ser hermético, el concreto también debe estar libre de agrietamientos y de celdillas.

1.3 Tipos de poros que se encuentran en el concreto

Como una consecuencia, es útil enumerar los varios tipos de poros presentes en el concreto y establecer sus contribuciones relativas a la permeabilidad.

Hay una variedad de tipos de poros en el concreto. Estos tipos pueden ser clasificados por lo que se refiere a su origen o por lo que se refiere a su efecto anticipado en los parámetros mensurables como la fuerza o permeabilidad. Las fuentes de porosidad en el concreto son:

- a) Poros en el gel de cemento
- b) Poros capilares pequeños
- c) Poros capilares grandes
- d) Vacíos grandes (también incluidos en esta categoría pueden estar los vacíos intencionalmente agregados por ejemplo por el arrastre del aire.)
- e) Porosidad asociada con las zonas de interfaz de pasta-agregado
- f) Microvacíos y discontinuidades asociadas con inestabilidades dimensionales que ocurren durante el curado
- g) Porosidad del agregado

Se asume que el diámetro de un poro de gel estable es de aproximadamente 2 nm. La selección de estos valores es basado en la suposición que los productos de hidratación no pueden precipitar en poros que tienen los diámetros más pequeños que el descrito anteriormente, porque la porosidad de gel reside en la hidratación de productos que se acumulan entre la fase líquida y los granos anhídridos del cemento. La porosidad del gel tiene un efecto mayor en la hidratación pero sólo un efecto menor en procesos de transporte que involucran los líquidos. Sin embargo, no hay en la actualidad ninguna justificación por ignorar los otros tipos de poros listados anteriormente. Así, la contribución de cada uno de los tipos restantes de porosidad a la permeabilidad debe ser considerada.

Desafortunadamente, las contribuciones relativas de cada uno de estas fuentes de porosidad a la permeabilidad no se ha llevado a cabo. Por consiguiente, conclusiones alcanzadas con respecto a la permeabilidad concreta son frecuentemente basadas en la extrapolación de resultados obtenidos para las pastas de cemento. Sin embargo, puede ser razonable subdividir la porosidad en el concreto en dos clases:

- a) En la matriz de pasta
- b) En la asociación entre el agregado e interfaz de pasta.

La fuente principal de la porosidad de la matriz que contribuye a la permeabilidad está asociada con el espacio residual entre granos de cemento que estaban originalmente llenos de agua. La contribución de esta fuente de porosidad puede ser dócil a la valoración por las investigaciones de pasta de cemento. Sin embargo, la contribución de la porosidad asociada con las zonas de interfaz entre pasta y agregados y las microgrietas que se desarrollan en esta región de interfase y se extienden dentro de la pasta deben de evaluarse por determinaciones llevadas directamente en los agregados por medio de su permeabilidad.

Puede considerarse que dos tipos de porosidad forman la red de porosidad capilar en el cemento y concreto: la porosidad capilar tanto grande como pequeña. Una razón por categorizar la porosidad de esta manera se relaciona a la influencia química y las mezclas minerales en los dos tipos. Se asume que la porosidad capilar tiene un efecto mayor en los procesos de transporte pero sólo un efecto menor en las proporciones de hidratación. Los diámetros de poros capilares pueden en teoría dar valores muy pequeños a grandes.

Sin embargo, ha sido propuesto que el más bajo límite del diámetro de porosidad capilar es 100 nm., hay que notar una diferencia clara entre el tamaño de un poro del gel (2 nm) y el límite más bajo en el tamaño del poro capilar.

Según la clasificación de IUPAC² de tamaños de poros, el diámetro de un microporo es de 2 nm o menos, mientras el de un mesoporo está entre aproximadamente 2 y 50 nm. Los mesoporos están entre un rango de tamaño que sirven para las interacciones electrostáticas entre las paredes del poro y el líquido que se filtra y se extiende por encima de un fragmento significativo del área de sección transversal. Una consecuencia de esto puede ser que los procesos de transporte a través de poros que tienen los diámetros en este rango son obstaculizados por efectos electrostáticos. Se sabe bien que las mezclas minerales afectan la permeabilidad; la base para este efecto puede entenderse por lo que se refiere a la formación de una cantidad grande de porosidad en el rango de mesoporos. Sin embargo, esta vista requiere la comprobación experimental más allá para los sistemas de cemento de portland-puzolana y portland-escoria.

1.4 Técnicas para medir la porosidad

Se han usado tipos importantes de técnicas experimentales para medir la porosidad y/o su distribución en los materiales porosos. Estas técnicas son adsorción de gas, intrusión de mercurio, y las técnicas de la observación directa, incluso el seccionado de series y bastidor de poro, seguido por óptica o microscopía electrónica de exploración (SEM por sus siglas en inglés) que observan las secciones. A continuación se dará una descripción de estos tres métodos.

1.4.1 Adsorción de vapor de gas

Esta técnica involucra la adsorción de gas (incluido el vapor de agua) en las superficies interiores accesibles de un espécimen. Existe un grado significativo de incertidumbre con respecto a las correcciones entre fenómenos de la hidratación, distribuciones del poro-tamaño y propiedades de sistemas del cemento. Sin embargo, las áreas de las superficies interiores determinadas por los experimentos de adsorción de gas son dominadas por la porosidad del gel de cemento.

1.4.2 Observación directa (por microscopio)

Hay dos tipos de técnicas que observan la porosidad directa en la pasta de cemento, mortero, y concretos. El primero de éstos es la observación directa de poros grandes en una sección pulida en la que se usa un microscopio óptico. La observación de espacios nulos aéreos es un ejemplo. Sin embargo, la observación de poros más finos normalmente involucra la intrusión de un monómero y su polimerización o la intrusión y endurecimiento de un epoxy. La porosidad puede observarse entonces en la sección pulida o en las secciones delgadas vía un microscopio óptico. La observación de porosidad con un microscopio óptico frecuentemente se refuerza por el uso de tintes ordinarios fluorescentes. Esta técnica también se ha aplicado a la observación de microespacios en el mortero. La observación de porosidad por las técnicas ópticas está limitada por la resolución del microscopio óptico. Típicamente estos análisis se llevan a cabo bajo la magnificación de *40 a 400.

Las observaciones microscópicas ópticas también pueden llevarse a cabo en secciones pulidas, puliendo la sección bien sea con abrasivos o lijas que van desde mediano (como núm. 100) hasta fino (núm. 800).

El análisis de los datos del tamaño del poro de las secciones de serie puede usarse para congregarse un montaje de la estructura del poro tridimensional. Una variante menos tediosa de la técnica que prepara la sección de serie es el poro lanzado. El poro lanzado ha encontrado la aplicación en el análisis de los sistemas del poro en piedras que usan tanto método óptico como la microscopía del electrón pero tiene aplicación muy limitada en los cementos. En esta técnica la estructura del poro está llena de un material plástico y la matriz inorgánica se disuelve para revelar la red tridimensional del poro, la ventaja al poro lanzado es que es posible analizar la estructura del poro como una red.

La microscopía del electrón también se ha usado para analizar la porosidad en las secciones pulidas. Esto se cumple por la observación directa de los poros o estorbando los poros prontamente con un compuesto de un elemento descubierta por energía-dispersiva y el análisis de la radiografía, como un polímero de contenido de cloro, seguido por un análisis de área composicional para las regiones altas en cloro. Típicamente, esto puede hacerse con una resolución de 3 a 5 μm .

Sin tener en cuenta la técnica específica seleccionada, hay dos limitaciones mayores de observación de la dirección de la estructura del poro. La primera es la limitación en la resolución cuando la microscopía óptica está envuelta y la segunda limitación es con respecto a la habilidad de introducir epoxy o monómero en los poros pequeños. Sin embargo, sin tener en cuenta estas limitaciones, las observaciones directas de lanzamientos del poro, secciones pulidas y las secciones delgadas en el concreto con la imagen procesada se han desarrollado en una técnica poderosa para el análisis de la estructura del poro.

Actualmente, existen las normas ASTM C 457-82 que describen los pasos para realizar este procedimiento, además, esta norma se apoya en la norma ASTM C 856 que describe la observación en los agregados del concreto.

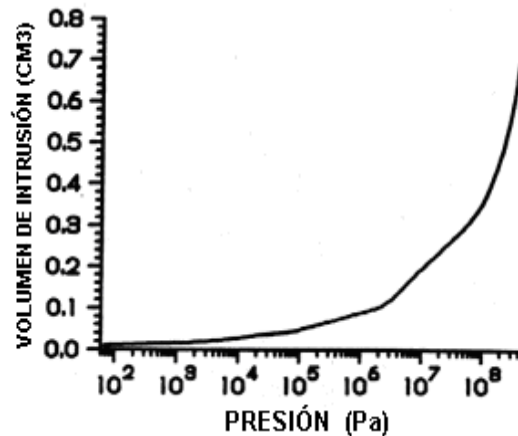
1.4.3 Porosímetro de intrusión de mercurio

Una técnica importante para determinar la porosidad es la intrusión de mercurio (MIP) que consiste en encerrar una muestra porosa en una cámara, rodeándola de mercurio y aplicando incrementos de presión monitoreados, midiendo el volumen del mercurio forzado hacia el interior de la muestra, el mercurio se supone no moja las superficies interiores de los poros. La intrusión provee la curva del volumen de intrusión vrs la presión (ver Fig. 1), dicha curva puede ser normalizada con una variedad de formas, como por ejemplo: dividir el volumen por el peso de la muestra (que rinde unidades tales como cm³/g) o dividir por el volumen de la muestra a granel (que rinde una porosidad acumulada en porcentaje) utilizada para estimar la porosidad total. Las presiones que fuerzan la intrusión pueden convertirse al tamaño equivalente del poro usando la siguiente forma de la ecuación del Washburn⁴:

$$d = \frac{-4\gamma \cos \theta}{p} \quad (1)$$

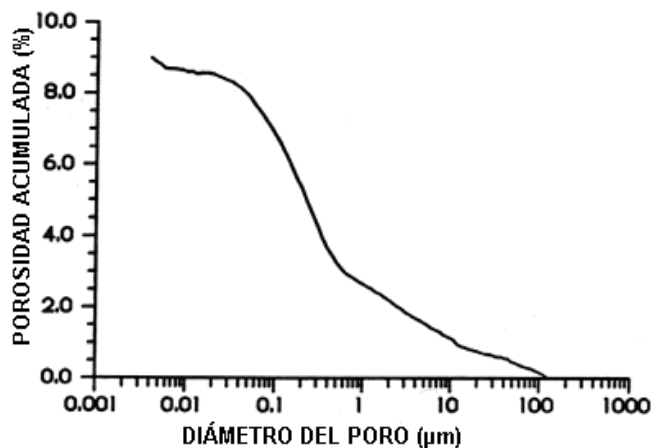
Donde “d” es el diámetro equivalente de los poros donde se ha hecho la intrusión, “ γ ” es la tensión superficial del mercurio, “ θ ” es el ángulo de contacto entre el mercurio y las paredes del poro, y “p” es la presión a la cual un incremento de mercurio dado se interna al sistema poroso. El equipo porosimétrico designa variedades pero típicamente provee un rango máximo de presión entre 0.004 y 400 Mpa. Este rango de presión corresponde al tamaño del poro desde diversos cientos de microporos (con presión baja) hasta unos cuantos nanoporos (con presión alta).

Figura 1. Curva de datos de porosidad: volumen de intrusión vrs presión



Fuente: Raymond A. Cook, and Kenneth C. Hover, **ACI Material Journal**, p. 153

Figura 2. Curva del porcentaje de porosidad (%) vrs diámetro del poro



Fuente: Raymond A. Cook, and Kenneth C. Hover, **ACI Material Journal**, p. 153

El diagrama normalizado del volumen de la intrusión vrs el diámetro del poro equivalente da una curva de porosidad acumulada (ver Fig. 2), el mejor valor de porosidad en esta curva (que corresponde a la presión más alta y al tamaño equivalente del poro más pequeño) es una estimación de la porosidad total de la muestra.

El tamaño del poro equivalente corresponde a la pendiente más alta de la curva y es el tamaño del poro por el cual el mercurio penetra al vacío de la muestra generalizadamente. Esta característica del tamaño del poro es referida a veces como el umbral (mínimo) o el tamaño de poro crítico. La forma de la curva (o las características de la curva) provee una indicación de la microestructura del material y puede ser utilizada para distinguir entre diferentes materiales a base de cemento.

Generalmente se observa cierta conducta con las muestras de intrusión de mercurio, algún resto del mercurio estorba bajo restos de presión atrapados en los especímenes de cemento cuando la presión en la cámara cambia, aunque es supuesto que el mercurio no moja las superficies del espécimen. Este es el resultado de la fuerza del mercurio en los poros de cuello-pequeño. Una consecuencia de este fenómeno son esos poros grandes con los cuellos pequeños que parecen tantos poros pequeños. Cerbesi³ informó que aproximadamente el 75% del volumen de los poros de pasta de cemento llenos con el MIP están compuestos de poros de sección perpendicular uniforme. El siguiente 25% son los poros botella de tinta. El transporte de fluidos en la muestra es principalmente afectado por los diámetros mínimos de poros, este fenómeno puede influir en la interpretación de datos del MIP con respecto a la permeabilidad.

Al igual que el fenómeno anterior hay otros factores o suposiciones que afectan los datos del porosímetro de intrusión de mercurio los deben de corregirse para tener valores certeros de la intrusión realizada. A continuación se describirán algunas de esas correcciones que son las que más afectan en el ensayo.

1.4.3.1 Correcciones para los datos de volumen

A presiones altas, las lecturas del volumen introducido se denotan “ V_o ”, son no sólo una medida de la intrusión de volumen hacia el interior de la muestra, sino que también contiene volúmenes significantes correspondientes a la expansión de la máquina “ V_{em} ”, la compresión del mercurio en la cámara de la muestra “ V_{cHg} ”, y la compresión del volumen no introducido de la misma muestra “ V_{cs} ”. (La expansión de la máquina puede resultar en un incremento en el volumen del aparato que contiene mercurio. Hasta aquí, las lecturas de volumen incorrectas incluirán una intrusión aparente que actualmente corresponde al volumen de mercurio requerido para llenar el volumen adicional). Para llegar al volumen de intrusión actual, hacia el interior de la muestra “ V_{int} ”, estos otros componentes del volumen (V_{em} , V_{cHg} , y V_{cs}) deben ser abstraídos de las lecturas de volumen incorrectas:

$$V_{int} = V_o - (V_{em} + V_{cHg} + V_{cs}) \quad (2)$$

1.4.3.1.1 Correcciones principales por expansión de maquinaria y compresión de mercurio

Las lecturas del volumen entrometido son correctas comúnmente al utilizar las lecturas del volumen entrometido de una corrida experimental realizada con una cámara de muestra vacía. Dicho experimento realizado es conocido como una corrida de referencia. Las lecturas del volumen objetivo con las sumas de la expansión de la maquinaria y del volumen del mercurio necesario para llenar una celda o poro vacío “ V_{cHg} ” son:

$$V_{blank} = V_{em} + V_{cHg} \quad (3)$$

Se asume que el volumen del mercurio con el cual se llena una celda vacía es aproximadamente igual al volumen del mercurio que llena la celda completa, entonces “ $V_{cHg} \approx V'_{cHg}$ ”. Si también se asume que la muestra es esencialmente incompresible entonces la Ec. (3) puede ser sustituida en la Ec. (2) para obtener la siguiente expresión:

$$V_{int} = V_o - V_{blank} \quad (4)$$

1.4.3.1.2 Compresión diferencial de mercurio

Mientras que la Ec. (4) es con frecuencia la única corrección aplicada a los datos sin corrección de la intrusión, otra corrección para tomar en cuenta es la compresión del mercurio en la corrida con la cámara de muestra vacía vrs la corrida experimental (celda cargada), que puede ser importante. Cuando una corrida experimental es realizada, la muestra desplaza un volumen de mercurio igual al volumen de vacíos de la muestra “ BV_{sample} ”. Por lo tanto, la corrida de referencia incluye la compresión de un volumen de mercurio (igual a BV_{sample}) la cual no está presente en la corrida experimental, “ V''_{cHg} ”. Aunque la compresión del mercurio en la corrida de referencia puede ser asumida como la suma de dos partes: la compresión de un volumen de mercurio igual al que se encuentra presente en la corrida experimental “ V_{cHg} ”, y la compresión de un volumen adicional de mercurio durante la corrida de referencia “ V''_{cHg} ”, así:

$$V'_{cHg} = V_{cHg} + V''_{cHg} \quad (5)$$

Una forma de la ecuación de Tait puede ser utilizada para calcular un volumen de compresión correspondiente al componente adicional de la corrida de referencia como sigue⁵:

$$V''_{cHg} = 0.175(BV_{sample}) \text{Log}_{10} \left(1 + \frac{p}{1820\text{MPa}}\right) \quad (6)$$

Las Ec. (2), (3), y (5) pueden ser combinadas para obtener:

$$V_{int} = V_o - V_{blank} + V''_{cHg} - V_{cs} \quad (7)$$

El significado de esta corrección incrementa con el aumento del tamaño de la muestra de referencia y el decaimiento de la porosidad. Una muestra de 4 ml de concreto con una intrusión real de porosidad del 10% a 400 Mpa aparentará tener una porosidad del 11.5%. Si el diferencial de compresión de mercurio se lleva a cabo.

1.4.3.1.3 Compresión de la muestra

Se mantiene para estimar el valor de la compresión del volumen de muestra entrometida. Dado el coeficiente de compresibilidad (el recíproco del módulo del vacío) " $\psi_{muestra}$ ", la siguiente relación simple puede ser usada:

$$V_{cs} = p(\psi_{muestra})(UV_{muestra}) \quad (8)$$

Donde, " $UV_{muestra}$ " es el volumen de la muestra en la que el mercurio no ha sido introducido, que es referido de aquí en adelante como el volumen no introducido.

Existen una gran cantidad de valores " $\psi_{muestra}$ " para los materiales de concreto. La materia es complicada más allá por la siguiente consideración. La porción de la muestra comprimida es la porción de la muestra en la que el mercurio no ha sido introducido.

Durante el experimento esta porción no introducida disminuye en volumen cuando se mueve el mercurio dentro de los poros de la muestra. Así, esto es proporcional a un volumen menor de poros en la porción no introducida de la muestra pues procede el experimento. Por lo tanto, la porosidad de la porción no introducida de la muestra disminuye con el incremento de la intrusión del mercurio. Desde que la compresibilidad es relacionada muy estrechamente con la porosidad de un material, " $\psi_{muestra}$ " cambia conforme el experimento progresa; además, la investigación será provechosa. En el intermedio, un valor entre $0.1 \cdot 10^{-10}$ y $0.8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ puede ser razonable, ver la siguiente tabla:

Tabla I. Valores de compresibilidad para varios materiales

Material	Compresibilidad m^2/N
Rango para la mayoría de materiales sólidos	$0.1 - 1.0 \cdot 10^{-10}$
Carbón	$0.7 - 2.3 \cdot 10^{-10}$
Cristal	$0.26 \cdot 10^{-10}$
Mercurio	$0.34 - 0.40 \cdot 10^{-10}$
Nylon	$1.9 \cdot 10^{-10}$
Compuestos de semiconductor	$0.1 - 0.8 \cdot 10^{-10}$
Agua	$3.5 - 4.6 \cdot 10^{-10}$

Fuente: Raymond A. Cook, and Kenneth C. Hover, **ACI Material Journal**, p. 155

1.4.3.1.4 Correcciones adicionales de volumen

Consideraciones adicionales pueden darse a efectos de temperatura y correcciones que dependen de configuraciones porosimétricas específicas.

Mientras esto es probable, las correcciones para las combinaciones de volumen resultantes de un incremento potencial en la temperatura del mercurio son muy apropiadas, esto no ha sido estudiado. Las correcciones del equipo dependiente pueden estar en ese orden.

1.4.3.2 Correcciones para los datos de presión

Cuando la muestra está en un lugar y rodeada de mercurio, es muy probable que se dé una diferencia en la presión entre la presión de la muestra y el centro geométrico de la muestra debido a la cabeza hidráulica del mercurio. También existirá un gradiente de presión a través de la muestra debido a la cabeza hidrostática. Dependiendo de la posición de la presión de la muestra usada en el aparato, la siguiente corrección puede ser utilizada:

$$p = p_o + \rho_{Hg}(g)(h_{Hg}) \quad (9)$$

Donde “ p_o ” es la medida de la presión incorrecta, “ ρ_{Hg} ” es la densidad del mercurio ($13,500 \text{ kg/m}^3$), “ g ” es la aceleración debida a la gravedad (9.806 m/seg^2), y “ h_{Hg} ” es la altura de la columna de mercurio desde el centro geométrico de gravedad de la muestra hasta la superficie libre del mercurio o desde el centro de gravedad hasta la superficie de presión, que de todas formas es menor.

1.4.3.3 Valores del ángulo de contacto y la tensión de superficie

Antes de que la Ec. (1) pueda ser utilizada, los valores de contacto y tensión de superficie deben ser seleccionados. El cambio de ángulo de contacto tiene un efecto sobre la curva alterándola de forma horizontal.

Muchos factores pueden afectar el ángulo de contacto, incluyendo el material utilizado, el método de secado, y la pureza del mercurio. Para la porosimetría de materiales de concreto, dos valores son comúnmente utilizados: 117° (generalmente para los materiales secados en horno) y 130° (generalmente para los materiales secados con otros medios).

Los valores más comunes de la tensión de superficie son: 0.473, 0.480, y 0.484 N/m, siendo 0.480 N/m el más predominante en el uso. Los efectos del cambio de tensión de superficie son similares al del ángulo de contacto en el que la curva de intrusión es desplazada horizontalmente. El rango de datos aceptables en este caso es menor. Por lo tanto el cambio de la tensión de superficie dentro del rango de valores comúnmente aceptados tiene efectos menores que el cambio del ángulo de contacto.

1.4.3.4 Forma del poro






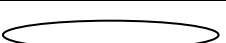

La Ec. (1) fue derivada para poros de sección transversal circular, que es la forma más común a utilizarse. Una expresión más general se puede derivar para poros de sección transversal elípticos o sesgados, la expresión es la siguiente:

$$d = \frac{-\phi\gamma \cos \theta}{\rho} \quad (10)$$

Donde “ d ” es la dimensión angosta del poro (diámetro de entrada), “ ϕ ” es el factor en la función de la forma, “ γ ”, “ θ ” y “ ρ ” se utilizan como se describió anteriormente. La tabla II presenta varios factores en función de la forma del poro.

En el concreto existen no sólo una forma del poro, sino que muchas formas de poros, entonces ¿cuál factor es el que debe utilizarse?, la mayoría de los investigadores usan una ecuación basada en una sección circular transversal, en donde el factor de la sección es 4.0. Considerando que el sistema de poros de materiales basados en cemento es complejo, aparecen poros de sección transversal irregular, entonces, un valor de forma de poro intermedio, tal como 3.0 puede resultar de mayor exactitud. Como con la selección del ángulo del contacto y de la tensión de superficie, las diferencias en factor de forma tienen el efecto de cambiar de lugar de la derecha a la izquierda la distribución de tamaño del poro.

Tabla II. Factores de forma para uso en la Ec. (10)

Sección perpendicular del poro		Valor de ϕ
Circular		4.00
1.5:1 Elíptico		3.37
2:1 Elíptico		3.08
4:1 Elíptico		2.73
8:1 Elíptico		2.56
16:1 Elíptico		2.56
Abertura (paredes paralelas)		2.00

Fuente: Raymond A. Cook, and Kenneth C. Hover, **ACI Material Journal**, p. 155

1.4.3.5 Cambio en la tensión de superficie con el tamaño del poro

Hasta este punto, “ γ ” había sido utilizada como constante mientras dura un experimento. Ahora se sabe que si el radio de la curvatura de un menisco de mercurio decrece desde el infinito, la tensión de superficie del mercurio también disminuye. Si a “ γ_{∞} ” se le puede asignar un valor de tensión de superficie discutido o determinado anteriormente. Si “ γ_{∞} ” es la tensión de superficie para una superficie plana de mercurio, el ajuste del valor de la tensión de superficie para una superficie curva de mercurio “ γ ” se da por:

$$\gamma = \left(\frac{\gamma_{\infty}}{1 + 2b/R} \right) \quad (11)$$

Donde “ b ” es el radio efectivo de un átomo de mercurio (aproximadamente 270 picómetros) y “ R ” es el radio de curvatura del menisco. El ajuste es negligente, al menos que “ R ” sea de similar orden en magnitud que “ b ”. Mientras la tensión de superficie es determinada usando técnicas empleadas para valores relativamente grandes de “ R ”, “ γ_{∞} ” se le puede asignar un valor de tensión de superficie discutido o determinado anteriormente.

Reconociendo que “ $R = d/(-2\cos\theta)$ ” y sustituyendo la Ec. (11) en la Eq. (10), resulta la forma general de la ecuación de Washburn:

$$d = \frac{-\phi\gamma_{\infty}\cos\theta}{\rho} + 4b\cos\theta \quad (12)$$

Para un valor de " θ " dado, el segundo término es constante (aproximadamente 690 picómetros para $\theta = 130^\circ$). Mientras, la corrección disminuye el tamaño del poro calculado en un 10% para presiones menores de aproximadamente 110 MPa, para experimentos con presiones más altas correcciones en el orden del 30% pueden ser obtenidas.

1.5 Modelos para la distribución del tamaño del poro en cementos

A pesar de la variedad de limitaciones, previamente discutidas, la intrusión de mercurio ha llegado a ser considerada como un medio normal por el que la estructura del poro de pastas de cemento se examina. Se relaciona la presión a que el mercurio fluirá en un poro con el tamaño de ese poro. Así, se determina el volumen de mercurio retenido en función de la presión necesaria para la intrusión. Mientras los datos de este tipo son útiles comparando las distribuciones del poro-tamaño relativas en varias pastas de cemento, el análisis extenso exige extraer descriptores de estas distribuciones del poro-tamaño. Tales descriptores pueden entonces utilizarse en expresiones de la permeabilidad.

El método más común de analizar los datos de porosidad es determinar un tamaño del poro promediado. Este es el acercamiento más real. Sin embargo, desde el punto de vista de esos procesos que afectan la porosidad de cemento, no puede ser mejor el acercamiento, Más bien, debe definirse la naturaleza de las distribuciones del poro-tamaño en condiciones que pueden tratarse cuantitativamente. Esto hace más fácil describir los tamaños de poros usando una función. La forma general de una función que puede usarse para describir una distribución del poro-tamaño acumulativa es:

$$P(R > r) = \int_r^{\infty} V(r)dr; \quad P(0)=1 \quad (13)$$

Donde “ $P(R>r)$ ” es la probabilidad que un poro tendrá un radio más grande que “ r ”, es decir, la distribución de poro-tamaño acumulado, y “ $V(r)dr$ ” es la fracción de volumen de espacio del poro cuyos radios están entre “ r ” y “ $r+dr$ ”. La probabilidad que un poro tendrá un radio más grande de cero es la unidad.

Poco parece haber sido hecho por lo que se refiere a funciones de la distribución en vías de desarrollo que describe la porosidad de pastas de cemento. Una investigación que aporta mucho en cuanto a este tema fue presentada por Diamond y Dolch⁶. En esta investigación se informó que la distribución en los tamaños de los poros en una pasta de cemento endurecida pudiera describirse por una función de la distribución registro-normal. Los datos de esta investigación se obtuvieron por el porosímetro de intrusión de mercurio.

Diamond⁷ también midió las variaciones en las distribuciones del poro-tamaño con las temperaturas de 6° a 40°C. Observó que esas distribuciones del poro-tamaño eran inicialmente más toscas en pastas curadas a temperaturas elevadas pero que las diferencias se pusieron despreciables después de aproximadamente un mes de curada la pasta. En el acuerdo con trabajo más temprano, Diamond observó también que la distribución en la porosidad puede tratarse como registro-normal. En las técnicas estadísticas robustas usando el *Shi et al*, se observó que es posible describir las distribuciones en el tamaño del poro en la pasta de cemento y morteros en términos de una combinación lineal de distribuciones de registro-normal. Las ecuaciones usadas para describir la distribución de la porosidad tienen la siguiente forma:

$$p(r) = \sum f_i p(r, \mu_i, \sigma_i); \quad \sum f_i = 1.0 \quad (14)$$

Donde “ $p(r)$ ” es la función probabilidad densidad, “ f_i ” el factor de peso de la i -ésima subdistribución de registro-normal, y “ μ_i ” y “ σ_i ” son el parámetro de localización y parámetro de la forma en el subdistribución del i -ésimo registro-normal “ $p(r, \mu_i, \sigma_i)$ ”, respectivamente. Como en los beneficios de la hidratación, los parámetros de la situación cambian significativamente, mientras los pesos relativos de la subdistribución y el cambio de parámetro son de forma relativamente pequeña. Esta distribución es muy importante porque es posible describir la variación en la distribución de porosidad como una función de la relación agua-cemento y como una función del tiempo de curado en términos de la variación de parámetros que tienen la importancia estadística directa. Estos parámetros pueden incorporarse, a su vez, en las relaciones de estructura-permeabilidad del poro.

1.6 Modelos para la permeabilidad del cemento y concreto

Debido a que los poros se comunican entre sí, los fluidos corren entre el cemento y el concreto a través de los poros comunicados, y esto se da a través de la permeabilidad tanto de cementos como del concreto, es por ello que es necesario considerar modelos de permeabilidad, de los cuales se describen algunos a continuación.

1.6.1 Modelos empíricos

En general, la permeabilidad es una medida de la facilidad con que pasan los fluidos a través de un cuerpo poroso, a continuación se describen algunos de los métodos usados para determinar la permeabilidad (no obstante existen muchos más métodos basados en otras teorías). La expresión más usada que describe la permeabilidad “ k ”, es la ley de Darcy:

$$k = -\mu Q / [A \delta g (dh / dz)] \quad (15)$$

Donde “Q” es el volumen de fluido descargado por unidad de tiempo a través del área de sección perpendicular “A”, “μ” es la viscosidad del fluido, “δ” es la densidad del fluido. “g” la aceleración de la gravedad, y “dh/dz” el gradiente hidráulico en la dirección del flujo, “z”.

Otro modelo simple es el de Poiseuille. La ley de Poiseuille indica que el volumen que atraviesa un tubo capilar de diámetro “r” es:

$$Q = -\pi r^4 / 8\mu dP / dl \quad (16)$$

Donde “μ” es la viscosidad del fluido y “dP/dl” es el gradiente de presión que causa el flujo a lo largo de un tubo de longitud “l”. Los dos modelos anteriores simples pueden combinarse para desarrollar una expresión para la permeabilidad. Asumiendo que la porosidad en una sección perpendicular a través de un material con el fragmento de porosidad total “ε” son el resultado de las interacciones de poros que tienen diámetros diferentes “r_i”, el término “A” en la ley de Darcy puede expresarse como “S/ε”. “S” es el área de la sección del poro. En este caso, el flujo de volumen total puede expresarse en ambas leyes, ley de Darcy y ley de Poiseuille así:

$$Q = -(S / \varepsilon) k / \mu dP / dl \quad (\text{Ley de Darcy}) \quad (17)$$

$$Q = -\sum \pi (r_i)^4 / 8\mu dP / dl \quad (\text{Ley de Poiseuille}) \quad (18)$$

(Los términos “g” y “δ” resultan con la única diferencia de unidades), y combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene que:

$$\begin{aligned}
k &= \varepsilon / S \sum \pi(r_i)^4 / 8 = \varepsilon (\sum \pi(r_i)^2 (r_i)^2 / 8) / S = \varepsilon (\sum S_i (r_i)^2 / 8) / S \\
&= \varepsilon \langle r^2 \rangle / 8
\end{aligned}
\tag{19}$$

Donde “ S_i ” es el área de la sección transversal del poro de radio “ r_i ” y “ $\langle r^2 \rangle$ ” es la media del cuadrado del radio del poro, o el segundo momento de la distribución del radio-poro. Este modelo relaciona la permeabilidad a la porosidad y el promedio del tamaño del poro asumiendo que los poros son tubos y no están interconectados.

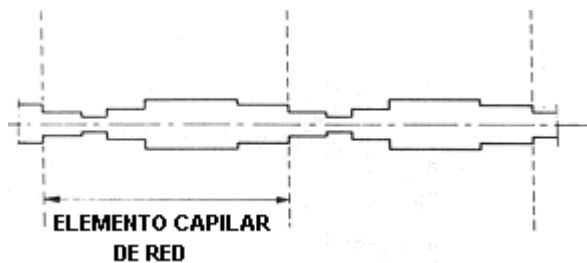
1.6.2 Modelos de redes

El modelo de Darcy-Poiseuille, y algunos otros modelos desarrollados intentan relacionar la permeabilidad con un cierto medio descriptor de porosidad, o con la porosidad total. No consideran las estructuras en una red de poros. A pesar de esta limitación estos modelos pueden, en algunos casos, predecir cualitativamente la permeabilidad del concreto. Sin embargo, las predicciones basadas en estos modelos se consideran con frecuencia inadecuadas. Estudios en las geociencias condujeron a desarrollar un modelo de red para describir la permeabilidad. Desde entonces, los modelos de red que describían sistemas de poros se han desarrollado en las áreas de la geofísica, geología del petróleo, los suelos, y la ingeniería química. Sin embargo, ninguno parece haber sido desarrollado específicamente en el área del cemento y del concreto, pero se pueden asemejar por las características porosas que tienen los materiales que se han usado en el concreto.

Los modelos de red se basan en la analogía de la ley de Darcy para flujo de fluidos y la ley de Ohm para el flujo actual. En un modelo basado en rocas, Seeburger y Nur⁸, investigaron los efectos de confinar la presión del módulo de permeabilidad y de vacíos en rocas usando un modelo de espacio de poro de red como herramienta.

En dicho modelo de red, los elementos son tubos capilares de longitud, sección transversal, y forma dada. El cambio de la permeabilidad con la presión hidrostática confinada es causado por el efecto del campo de tensión en la forma y las características de flujos constantes de cada elemento. En un modelo desarrollado por Dullien⁹, una red consiste en muchas subredes de poros que tienen el tamaño de entrada del poro más pequeño (ver Fig. 3)

Figura 3. Elemento de una red de poros, en donde los tamaños del poro pueden ser muy variado.



Fuente: Jan Skalny, and Sydney Mindess, **Materials Science of Concrete II**, p. 97

Cada subred se trata como un canal de flujo. El flujo de volumen en cada canal es determinado por el cuadrado del diámetro de los poros en ese canal. El volumen de flujo total es la suma de los flujos en todos los canales de flujo. El modelo de Dullien se escribe como sigue:

$$k = \varepsilon \langle D^2 \rangle / 96 \quad (20)$$

Donde “ D^2 ” es la medida del diámetro al cuadrado del poro y “ ε ” la porosidad. El valor de la constante en la ecuación anterior difiere en el modelo clásico de Poiseuille, Ec. (19) por un factor de 3. Dullien interpretó estas diferencias en un factor de tortuosidad.

Sin embargo, es dudoso si los factores de tortuosidad son una constante. Un factor de tortuosidad es más probablemente una variable dependiente dentro de la microestructura. La medida del diámetro al cuadrado del poro en el modelo es determinado por una variación de la distribución del diámetro del poro como sigue.

El porosímetro de intrusión de mercurio puede determinar solamente la entrada del tamaño del poro. El análisis de la imagen cuantitativamente puede determinar el verdadero tamaño del poro, aunque sólo en dos dimensiones. Si en las curvas de distribución del tamaño del poro determinadas por este método, se da el traslape entero del rango de tamaños del poro, una variante de la distribución del poro-tamaño se puede expresar como " $p(D, D_e)$ " donde " D " es el verdadero diámetro del poro y " D_e " es el diámetro de entrada del poro.

Dullien desarrolló un simple procedimiento gráfico para estimar el volumen de poros que tienen el verdadero diámetro " D " a " $D+dD$ " y la entrada del diámetro " D_e " a " D_e+dD_e ". Una variante de la distribución fue encontrada conveniente para ser tomada en cuenta para ambas distribuciones. De esta variación de la distribución, Dullien estimó que la relación entre el diámetro de entrada del poro y el diámetro del poro puede determinarse. Debe notarse, sin embargo, que la variación de la distribución no puede establecerse a menos que dos distribuciones pasen por encima del rango entero del tamaño del poro.

En los materiales menos porosos, como el cemento y el concreto, hay normalmente muchos poros finos, que no son fáciles de observar por el análisis de la imagen. Además, hay poros muy grandes (vacíos) que pueden ser difíciles de medir por el porosímetro de mercurio. Así, si pasa del rango entero de porosidad no puede ser posible.

También merece la pena notar que la distribución del poro-tamaño determinado por el análisis de imagen representa la distribución del tamaño de las intersecciones de poros en un plano (dos dimensiones). La tridimensional, o verdadera distribución de volumen de poros, debe estimarse usando los procedimientos estereológicos.

1.6.3 Modelos basados en la teoría de la filtración

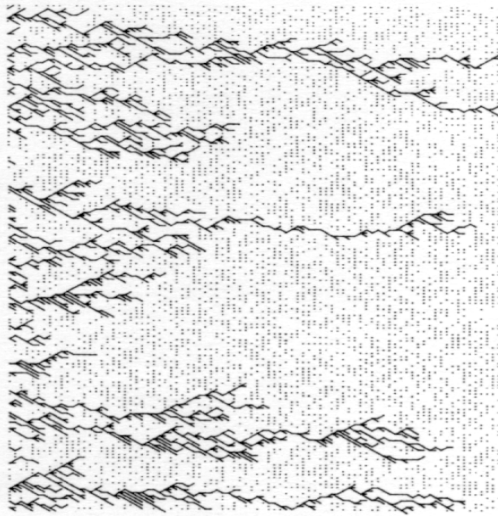
A finales de los años 50's se introdujo un término dentro de esta rama llamado "teoría de la filtración" que describe un fenómeno crítico, o conducta de transición de fase. Las bases para la teoría de la filtración pueden ser consideradas en términos de la ocupación del sitio de un enrejado. Una primera suposición es que cada sitio cualquiera está ocupado o vacío basado en el proceso completamente aleatorio que es independiente de la ocupación de los sitios vecinos. La probabilidad de un sitio ocupado es " p " y " $(1-P)$ " es la probabilidad de un sitio vacío.

Los sitios ocupados se aíslan de un adyacente vacío para formar racimos. Si la ocupación del sitio tiende a cero, más de los sitios ocupados se aislarán. Si, por otro lado, la ocupación del sitio está cerca de la unidad, entonces casi todos los sitios ocupados se conectan entre sí para formar un racimo grande que se extiende de un lado al otro del enrejado.

Este racimo grande representa una trayectoria infinita. Se filtra a través del enrejado de manera semejante a la manera que el líquido se filtra a través de los materiales porosos a lo largo de la red de poros conectados, aumentando la ocupación del sitio de cero a la unidad, y produciendo así un punto crítico (lo máximo de la filtración), " P_c ", sobre el cuál puede formar una trayectoria infinita. La ocurrencia de una trayectoria infinita se ilustra en la figura 4, para un modelo simple del líquido que atraviesa un medio poroso.

La filtración descrita anteriormente es llamada filtración del sitio. Hay contrapartes llamadas filtración en enlace. En este caso, cada sitio dentro del racimo es ocupado y las interconexiones entre los sitios vecinos son estimadas como enlaces. En este caso, " p " es la probabilidad que un enlace esté abierto y " $(1-p)$ " la probabilidad de que un enlace esté cerrado. Un racimo es un grupo de sitios vecinos conectados por las ataduras abiertas. La filtración máxima, " P_c ", es la fracción de ataduras abiertas alrededor de un camino infinito que no puede formarse como un racimo. El líquido que atraviesa los materiales porosos se puede modelar en términos de su paso a través de poros de una interconexión de la red.

Figura 4. Elemento de una red de poros, en donde los tamaños de los poros pueden ser muy variados.



Fuente: Jan Skalny, and Sydney Mindess, **Materials Science of Concrete II**, p. 100

Entre la filtración del sitio y la filtración del enlace hay un tipo de filtración llamado sitio-enlace de filtración. Los sitios del enrejado no son largamente ocupados al igual que la filtración en el enlace. En el sitio-enlace de filtración, “ p ” es la probabilidad que haya una atadura entre los sitios vecinos. Un racimo es entonces un grupo de sitios ocupados vecinos conectados por enlaces. El umbral (máxima) en enlace de la filtración disminuye de la unidad, cuando la porción de sitios ocupados iguala el umbral (máxima) de la filtración del sitio, al umbral (máxima) en enlace normal de la filtración, cuando la fracción de sitios ocupados es la unidad.

Este tipo de filtración parece representar lo más de cerca posible la naturaleza del líquido que atraviesa los materiales porosos. La fracción de sitios ocupados es equivalente a la porosidad, los enlaces representan los canales que conectan poros y un racimo representa los poros de la trayectoria infinita. Los canales pueden consistir en entradas y grietas del poro.

En la teoría de la filtración, “ P ” se define como la fuerza de la red infinita. La fuerza “ P ”, es la probabilidad de la filtración que un sitio pertenece a la trayectoria infinita. Es realmente la fracción del número total de los sitios del enrejado que están en una red infinita. Una expresión de la ley de la energía puede ser escrita así:

$$P = (p - p_c)^t \quad (21)$$

Si “ p ” se acerca a “ p_c ” de donde anteriormente “ p ” es la concentración del sitio o de enlaces ocupados, y “ p_c ” es la concentración crítica. Las características del transporte son proporcionales a “ $(p-p_c)^\alpha$ ”, donde “ α ” es el exponente de transporte. Sin embargo, “ t ” usualmente difiere de “ α ” porque “ P ” cuenta para la columna principal y los callejones sin salida. Los callejones sin salida contribuyen a la masa de la red infinita pero no transportan características. Sin embargo, los callejones sin salida encierran el líquido.

Desde el punto de vista del flujo en materiales porosos, una red infinita consiste en dos porciones: columna principal y callejones sin salida. El líquido atraviesa un material poroso a lo largo de las columnas principales y se encierra en callejones sin salida. La medida de la permeabilidad trata generalmente solamente del flujo que atraviesa; sin embargo, el líquido encerrado puede afectar perceptiblemente características, tales como la resistencia hielo-deshielo del concreto. Es necesario considerar fenómenos asociados al flujo de columnas principales y callejones sin salida. La simulación de computadora se puede utilizar para distinguir callejones sin salida de las columnas principales y para calcular fracciones de las columnas principales y de callejones sin salida con respecto a la red infinita; con los estudios numéricos se pueden cuantificar las columnas principales.

Varios de los modelos descritos previamente se pueden considerar en términos de los conceptos de filtración. La teoría de la filtración y la ley de Archie¹⁰ utilizan una ley de energía para describir el fenómeno crítico. Así, la ley de Archie se puede mirar como caso especial en el cual la mínima filtración sea cero. Para los materiales densos todavía permeables, el mínimo de filtración puede acercarse a un valor muy bajo. Por ejemplo, la sal de la roca tiene una porosidad de solamente 0.6% pero una permeabilidad de darcy de $7.9 \cdot 10^{-6}$.

Dullien observó que la permeabilidad de la piedra arenisca al mercurio depende del grado del poro que se prellena por el mercurio. Es decir, los poros de un tamaño dado que fueron llenados previamente de mercurio contribuyeron a la permeabilidad mientras que los que no fueron llenados no contribuyeron al flujo a granel.

Dullien concluyó que en una saturación baja de mercurio debe haber canales continuos del flujo en el medio. En la saturación baja, solamente los poros de entrada más grandes son penetrados por el mercurio. Es decir, que estos canales de flujo consisten solamente en poros con las entradas grandes que pueden estorbarse por el mercurio. Sin embargo, si la saturación se reduce a un nivel muy bajo, no se registra ninguna permeabilidad. Esta saturación baja se debe relacionar con el mínimo de la filtración. Así, el modelo de Dullien y otro modelo estadístico desarrollado por Juang (no descrito en este trabajo) puede considerarse como los modelos de transición entre los modelos no filtrados-basados y los modelos filtrados-basados.

2. EFECTOS DE LA POROSIDAD EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

2.1 La resistencia del concreto

La resistencia de un material se define como la habilidad para resistir esfuerzos sin fallar. La falla se identifica algunas veces con la aparición de grietas. Sin embargo, debe hacerse notar que a diferencia de la mayoría de los materiales estructurales, el concreto contiene algunas grietas finas aun antes de estar sujeto a esfuerzos externos. En el concreto por lo tanto, la resistencia se relaciona con el esfuerzo requerido para causar fractura y es sinónimo del grado de falla en el que el esfuerzo aplicado alcanza su valor máximo. En las pruebas de tensión, la fractura de la pieza probada generalmente significa falla; en la compresión, la pieza probada se considera que ha fallado cuando, no habiendo señas de fractura externas visibles, el agrietamiento interno es tan avanzado que el espécimen es incapaz de soportar una carga mayor sin fracturarse.

En el diseño del concreto y en el control de calidad, la resistencia es la propiedad que generalmente más se especifica. Esto es debido a que en comparación con la mayoría de las otras propiedades, la prueba de resistencia es relativamente fácil. Además, muchas propiedades del concreto, tales como el módulo de elasticidad, el hermetismo al agua o impermeabilidad, y la resistencia a los agentes ambientales incluyendo las aguas agresivas, están directamente relacionadas con la resistencia y pueden por lo tanto ser deducidos de los datos de resistencia.

La compresión del concreto es muchas veces mayor que otros tipos de resistencia y la mayoría de los elementos de concreto están diseñados para aprovechar la mayor resistencia a la compresión del material. Aunque en la práctica la mayor parte del concreto es sometido simultáneamente a una combinación de esfuerzos de compresión, tensión y cortante en dos o más direcciones. Las pruebas a compresión uniaxial son las más fáciles de realizar en el laboratorio y la resistencia del concreto a la compresión a edad de 28 días es determinada por una prueba estándar uniaxial a la compresión, y se acepta universalmente como un índice general de la resistencia del concreto.

Aunque la relación agua/cemento es importante para determinar la porosidad tanto de la matriz como de la zona de transición, y por lo tanto la resistencia del concreto, factores tales como la compactación y las condiciones de curado (grado de hidratación del cemento), el tamaño del agregado y sus características minerales, los aditivos, la geometría de los especímenes, la condición de humedad, el tipo de esfuerzo y la velocidad de aplicación de la carga pueden tener también un efecto importante en la resistencia.

2.2 Relación entre resistencia y porosidad

Existe una relación muy importante entre la porosidad (la parte de huecos en el volumen) y la resistencia. Por consecuencia, en materiales de múltiples fases como el concreto, la porosidad de la estructura de cada uno de los componentes que unificándolos produce la porosidad del concreto son un límite a la resistencia.

Los agregados naturales son generalmente densos y resistentes; por lo tanto, la porosidad de la matriz de la pasta de cemento así como la de la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso, son las que generalmente determinan las características de resistencia del concreto de peso normal.

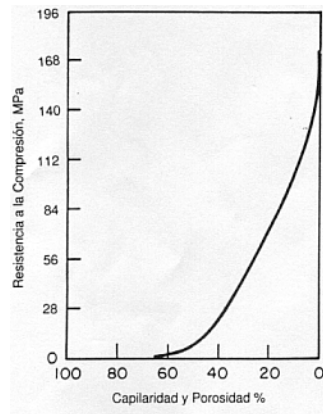
2.2.1 ¿Cómo se relacionan la resistencia y la porosidad?

En general, existe una relación inversa fundamentalmente entre la porosidad y la resistencia de los sólidos que para los materiales homogéneos simples puede expresarse de la siguiente forma:

$$S = S_0 e^{-kp} \quad (22)$$

En donde “ S ” es la resistencia del material que tiene una porosidad dada “ p ”; “ S_0 ” es la resistencia intrínseca a porosidad cero; y “ k ” es una constante. Para muchos materiales, la relación “ S/S_0 ” graficada contra la porosidad, sigue la misma curva descrita a continuación:

Figura 5. Relación porosidad-resistencia en cementos curados de varias formas



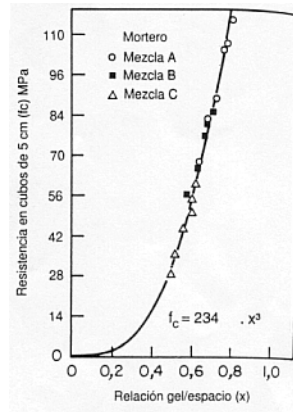
Fuente: P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, **CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales**, p. 34

Powers¹¹ encontró que la resistencia a la compresión a los 28 días “ f_c ”, de tres mezclas de morteros diferentes, estaba relacionada con la relación gel/espacio, o con la relación entre la hidratación de los productos sólidos en el sistema y el espacio total:

$$f_c = ax^3 \quad (23)$$

En donde “ a ” es la resistencia intrínseca del material a porosidad cero “ p ” y “ x ” la relación sólido/espacio o la cantidad de fracción de sólidos en el sistema, que es por lo tanto igual a $(1-p)$. Los datos que Powers encontró se muestran en la siguiente figura, y confirman lo planteado en la figura 5:

Figura 6. Morteros de cemento portland con diferentes proporciones de mezcla.



Fuente: P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, **CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales**, p. 34.

Mientras que en la pasta endurecida de cemento o mortero, la porosidad puede relacionarse con la resistencia, en el concreto la situación no es tan simple. La presencia de microgrietas en la zona de transición entre el agregado grueso y la matriz de la pasta de cemento hace al concreto un material demasiado complejo para predecir su resistencia por medio de relaciones precisas resistencia-porosidad. La validez en general de la relación resistencia-porosidad, sin embargo, debe respetarse porque las porosidades de las fases componentes del concreto, incluyendo la zona de transición, se convierten sin duda en una limitación a la resistencia.

Con un concreto que contenía agregados convencionales de baja porosidad o alta resistencia, la resistencia del material será regida tanto por la resistencia de la matriz de la pasta de cemento como por la resistencia de la zona de transición. Generalmente a edades tempranas, la zona de transición es más débil que la matriz, pero a edades posteriores, lo opuesto parece ser el caso dado.

2.3 Efectos de la porosidad en la resistencia a la compresión

La respuesta del concreto al esfuerzo aplicado depende no solamente del tipo de esfuerzo, sino también de cómo una combinación de varios factores afecta la porosidad de los distintos componentes estructurales del concreto. Los factores incluyen las propiedades y las proporciones de los materiales que constituyen la mezcla del concreto, el grado de compactación y las condiciones del curado. Desde el punto de vista de la resistencia, la relación entre la relación agua/cemento y la porosidad es indudablemente el factor más importante, porque independientemente de otros factores afecta la porosidad de ambos, la matriz de la pasta de cemento y de la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso.

La determinación directa de la porosidad de los componentes estructurales individuales del concreto: la matriz y la zona de transición es impráctica, y por lo tanto, no se pueden desarrollar modelos precisos para predecir la resistencia del concreto. Sin embargo, en los últimos tiempos se han encontrado muchas relaciones empíricas útiles, que en forma práctica proporcionan información indirecta pero suficiente acerca de la influencia de numerosos factores en la resistencia a la compresión (siendo la resistencia a la compresión ampliamente usada como un índice de todos los otros tipos de resistencia). Aunque la respuesta real del concreto al esfuerzo aplicado es un resultado de complejas interacciones entre varios factores, para simplificar y entender estos factores, se clasifican separadamente bajo tres categorías:

- Materiales, características y proporciones
- Condiciones de curado
- Parámetros de prueba

2.4 Efectos de la porosidad en el modo de falla del concreto

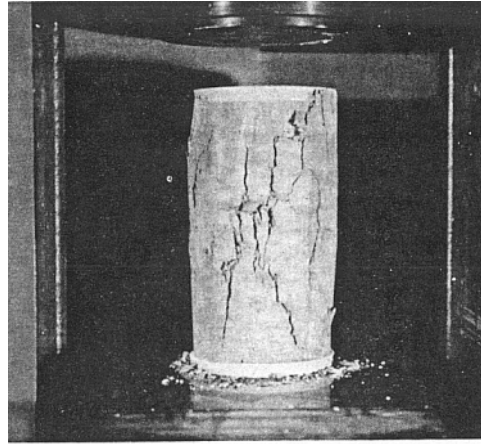
Con un material como el concreto, que contiene espacios vacíos de varios tamaños y formas en la matriz, y microgrietas en la zona de transición entre la matriz y los agregados gruesos, los modos de falla bajo esfuerzos son muy complejos y varían con el tipo de esfuerzo. Sin embargo, una breve revisión de los modos de falla será útil para entender y controlar los factores que influyen en la resistencia del concreto.

Bajo tensión uniaxial, se necesita relativamente menos energía para el inicio y crecimiento de grietas en la matriz. Una propagación rápida y la interconexión del sistema de grietas, que consisten en las grietas preexistentes en la zona de transición y las grietas nuevas formadas en la matriz, son las responsables de la falla frágil. En compresión, el modo de la falla es menos frágil porque se necesita energía considerablemente mayor para formar y para expandir las grietas en la matriz.

Se acepta en general que en una prueba de compresión uniaxial en el concreto de resistencia mediana o baja, no se inician grietas en la matriz hasta alcanzar aproximadamente 50% de la falla; en esta fase, un sistema estable de grietas, llamado grietas de cortante-adherencia, ya existe en la vecindad del agregado grueso.

A niveles más altos de esfuerzos, las grietas que se inician dentro de la matriz; aumentan su número y tamaño progresivamente al incrementarse los niveles de esfuerzo. Las grietas en la matriz y en la zona de transición (grietas cortante-adherencia) finalmente se unen, y por lo general se desarrolla una falla en la superficie aproximadamente 20 a 30° de la dirección de la carga, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7. Forma típica de falla del concreto a compresión.



Fuente: P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, **CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales**, p. 35.

3. EFECTOS DE LA POROSIDAD EN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

3.1 ¿Qué es la durabilidad del concreto?

Según el comité ACI 201, la durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir a la acción del tiempo los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, que el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio cuando se exponga a su medio ambiente. Ningún material es intrínsecamente durable; como resultado de interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades del concreto, cambian con el tiempo.

No obstante, hasta hace muy poco tiempo, los desarrollos en tecnología del cemento y del concreto se concentraban en alcanzar resistencias más y más altas, pues había una suposición de que el concreto resistente era concreto durable, las únicas consideraciones especiales eran los efectos de la alteración de congelación y deshielo y algunas formas de ataque químico. Ahora se sabe que, para muchas condiciones de exposición de las estructuras de concreto, ambas propiedades, resistencia y durabilidad, se han de considerar explícitamente en la etapa del diseño.

El agua generalmente involucrada en cada forma de deterioro y en los sólidos porosos y la permeabilidad del material al agua, generalmente determinan la velocidad del deterioro.

Primeramente, el agua, que es el agente principal tanto de creación como de la destrucción de muchos materiales naturales, sucede que es el centro de la mayoría de los problemas de la durabilidad del concreto; siendo pequeñas, las moléculas del agua son capaces de penetrar poros o cavidades extremadamente finos, es por ello que la porosidad contribuye bastante en el transporte de fluidos y por consecuencia a la durabilidad del concreto.

3.2 Influencia del sistema de poros en la durabilidad

El aspecto de la estructura de la pasta de cemento endurecido que tiene importancia respecto a la permeabilidad es la naturaleza del sistema de poros dentro del volumen de la pasta de cemento endurecido y también en la zona cerca de la interface entre la pasta de cemento endurecido y el agregado. La zona de interface ocupa desde un tercio hasta un medio del volumen total de la pasta de cemento endurecida en el concreto y se sabe que tiene microestructura diferente del volumen de la pasta de cemento endurecido. La interface es también el lugar de microagrietamiento temprano. Por estas razones, se espera que la zona de interface, contribuya significativamente a la permeabilidad del concreto. Sin embargo, Larbi¹² halló que, a pesar de la mayor porosidad en la zona de interface, la permeabilidad del concreto se controla mediante el volumen de la pasta de cemento endurecido, la cual es la única fase continua del concreto.

El soporte de la opinión de Larbi lo da el hecho de que la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido no es inferior que la del concreto hecho con una pasta de cemento similar.

Sin embargo, también es importante para el concreto el hecho de que cualquier movimiento de fluidos ha de seguir una trayectoria más larga y más tortuosa por la presencia del agregado, el que también reduce el área efectiva para el flujo. Así, permanece incierta la importancia de la zona de interface con respecto a la permeabilidad. Aún más generalmente se ha de admitir que la relación entre la permeabilidad y la estructura de poros de la pasta de cemento endurecido es, en el mejor de los casos, cualitativa.

Los poros importantes para la permeabilidad son aquellos con un diámetro de al menos 120 ó 160 nm. Estos poros han de ser continuos. Los poros que no son efectivos con respecto a flujo, esto es, respecto a permeabilidad, incluyen, además de los poros discontinuos, aquellos que contienen agua absorbida y aquellos que tienen una entrada angosta, aun si los poros mismos son grandes.

El agregado también puede contener poros, pero éstos suelen ser discontinuos. Además, las partículas de agregado son envueltas por la pasta de cemento de tal manera que los poros del agregado no contribuyen a la permeabilidad del concreto. Lo mismo se aplica a vacíos de aire discretos, tales como burbujas de aire arrastradas. Además, el concreto contiene vacíos a causa de la compactación incompleta o del agua de sangrado atrapada. Estos vacíos pueden ocupar entre una fracción del 1% y 10% del volumen del concreto; la última cifra representa un concreto altamente segregado de resistencia muy baja.

3.3 Transporte de fluidos en el concreto

Hay tres fluidos importantes que pueden entrar en el concreto: agua, pura o que lleva iones agresivos, dióxido de carbono y oxígeno. Ellos se pueden mover a través del concreto de diferentes maneras, pero todo el transporte depende de la pasta de cemento hidratado. La durabilidad del concreto depende principalmente de la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gaseosos, pueden entrar en el concreto y moverse a través de él; a esto se le llama comúnmente permeabilidad del concreto. La permeabilidad se refiere al flujo a través de un medio poroso, ahora, el movimiento de los fluidos a través del concreto sucede no solamente por el flujo a través del sistema poroso, sino también por difusión y por absorción o adsorción.

3.4 Relación entre porosidad y permeabilidad

Por causa de la existencia de poros de diferentes clases, de los cuales algunos contribuyen a la permeabilidad y otros no, es importante distinguir entre porosidad y permeabilidad. La porosidad es una medida de la proporción del volumen total del concreto ocupado por poros, y se acostumbra expresar en porcentaje. Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, éstos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad es también alta. Por otro lado, si los poros son discontinuos o inefectivos de otra manera con respecto al transporte, entonces la permeabilidad del concreto es baja, aun si su porosidad es alta.

Una indicación de la porosidad se puede obtener por la medición de la absorción del concreto. La absorción es el resultado del movimiento capilar en los poros del concreto que están abiertos al medio ambiente.

3.5 Absorción del concreto

El volumen de espacio de poros en el concreto, a diferencia de la facilidad con la cual un fluido puede penetrarlo, se mide por la absorción. Se acostumbra medir la absorción secando un espécimen hasta una masa constante, sumergiéndolo en el agua y midiendo el aumento de masa como un porcentaje de la masa seca. Se pueden emplear varios procedimientos, con los cuales variarán los valores. Una razón para esta variación en los valores de absorción es que, en un extremo, el secado a temperatura ordinaria puede ser ineficaz para remover toda el agua; por el otro lado, el secado a altas temperaturas puede remover algo del agua combinada. Por lo tanto, la absorción no se puede utilizar como una medida de la cantidad del concreto, pero casi todos los concretos buenos tienen una absorción debajo del 10% por masa; si se va a calcular el volumen ocupado por el agua, se necesita tomar en cuenta la diferencia en el peso específico del agua y del concreto.

La norma ASTM C 642-97 prescribe una prueba de absorción en varias porciones pequeñas de concreto, se emplea el secado de 100 a 110°C y la inmersión en agua a 21°C por lo menos durante 48 horas. Además, otra prueba similar a esa es la BS 1881: parte 122: 1983.

3.5.1 Pruebas de absorción superficiales

Para propósitos prácticos, lo que presenta mayores intereses es la característica de absorción de la zona exterior del concreto (la cual ofrece protección al acero de refuerzo). Por esa razón, se han desarrollado pruebas que miden la absorción superficial.

Una prueba para determinar la absorción superficial inicial está descrita en la norma BS 1881: parte 5:1970. En esencia, la rapidez de absorción del agua por la zona superficial del concreto se determina durante un período prescrito (que varía entre 10 minutos y 1 hora), bajo una carga de 200 mm de agua. Esta carga es sólo ligeramente mayor que la que sería causada por una lluvia vigorosa. La rapidez de absorción superficial inicial se expresa en milímetros por metro cuadrado por segundo.

La absorción inicial después de 10 minutos que sea mayor a 0.50 ml/m^2 por segundo se consideraría alta, y la que sea menor a 0.25 ml/m^2 por segundo, baja. Los valores correspondientes después de 2 horas son, respectivamente, mayores de 0.15 ml/m^2 por segundo y menores de 0.07 ml/m^2 por segundo.

Una deficiencia de la prueba de absorción superficial inicial es que el flujo de agua a través del concreto no es unidireccional. Existen varias pruebas modificadas para solucionar este problema, pero ninguna a sido normalizada.

Los resultados de la prueba de absorción superficial inicial no se pueden interpretar con prontitud, a menos que el concreto haya estado acondicionado para un estado higrométrico conocido antes de las pruebas. Este requerimiento no se puede satisfacer en el concreto en el sitio mismo. En consecuencia, un valor bajo de la absorción superficial inicial se puede deber, o bien a las características inherentes de baja absorción del concreto probado, o bien al hecho de que los poros del concreto de calidad pobre ya están llenos de agua.

Si se tiene la limitación anterior, se puede utilizar la prueba de absorción superficial inicial para comparar la eficiencia del curado de la zona exterior del concreto.

Figg¹³ desarrolló una prueba que da en cierta medida la facilidad con que el agua o el aire entran al concreto in situ. Se barrena un agujero pequeño y se llena con hule de silicón. El tapón se atraviesa con una aguja hipodérmica conectada a una bomba de vacío, y la presión del sistema se reduce en una cantidad dada. El tiempo requerido para que el aire pueda penetrar a través del concreto y aumentar la presión de la cavidad hasta un valor específico, es una indicación de la permeabilidad del concreto. Otro modelo del aparato hace posible valorar la permeabilidad del concreto al agua mediante la medición del tiempo en que un volumen dado de agua entra en el concreto.

Se deberá señalar que el término permeabilidad no es realmente válido porque la información proporcionada por las pruebas de Figg no se relacionan directamente con el coeficiente de permeabilidad según se definió propiamente. Sin embargo, las pruebas son útiles para propósitos de comparación.

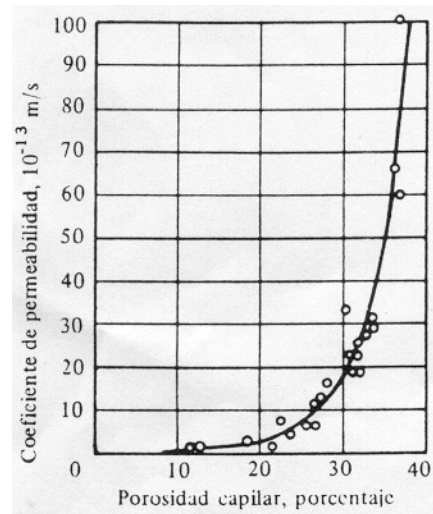
3.6 Permeabilidad al agua del concreto

Se puede notar que la pasta de cemento endurecido se compone de partículas conectadas por sólo una fracción pequeña de la superficie total de ellas. Por esta razón, una parte del agua está adentro del campo de fuerza de la fase sólida, es decir, está absorbida. Esta agua tiene una viscosidad alta, pero, a pesar de esto, es móvil y toma parte en el flujo.

Como ya se dijo, la permeabilidad del concreto no es una función sencilla de la porosidad del concreto, sino que también depende del tamaño, distribución, forma, tortuosidad y continuidad de los poros. Así, a pesar que el gel de cemento tiene una porosidad del 28% y su permeabilidad es de casi $7 \cdot 10^{-6}$ m/s, esto se debe a la textura extremadamente fina de la pasta de cemento endurecido: los poros y las partículas sólidas son muy pequeños y numerosos, mientras que, en las piedras, los poros, aunque menores en número, son mucho más grandes y conducen a una permeabilidad más alta.

Por la misma razón, el agua puede fluir más fácilmente a través de los poros capilares que a través de los muchos más pequeños poros del gel: la pasta de cemento es como un todo de 20 a 100 veces más permeable que el gel mismo. La permeabilidad de la pasta de cemento endurecido está controlada por su porosidad capilar. La relación entre estas dos cantidades se muestra en la figura 8. Por comparación, la tabla III presenta una lista de la relación agua/cemento de pastas que tienen la misma permeabilidad que algunas rocas comunes.

Figura 8. Relación entre la permeabilidad y porosidad capilar de la pasta de cemento.



Fuente: A. M. Neville, *Tecnología del Concreto*, p. 343.

Tabla III. Comparación entre permeabilidades de rocas y pastas de cemento

Tipo de roca	Coeficiente de permeabilidad (m/s)	Relación agua/cemento de pasta madura de la misma permeabilidad
Roca trapeana	$2.47 \cdot 10^{-14}$	0.38
Diorita de cuarzo	$8.24 \cdot 10^{-14}$	0.42
Mármol	$2.39 \cdot 10^{-13}$	0.48
Mármol	$5.77 \cdot 10^{-12}$	0.66
Granito	$5.35 \cdot 10^{-11}$	0.70
Arenisca	$1.23 \cdot 10^{-10}$	0.71
Granito	$1.56 \cdot 10^{-10}$	0.71

Fuente: A. M. Neville, *Tecnología del Concreto*, p. 343.

La permeabilidad de la pasta de cemento varía con el progreso de la hidratación. En una pasta fresca, el flujo de agua está controlado por el tamaño, la forma y concentración de las partículas originales de cemento. Con el progreso de la hidratación, la permeabilidad decrece rápidamente porque el volumen total del gel (incluidos los poros del gel) es aproximadamente 2.1 veces el volumen del cemento sin hidratar, de manera que el gel llena gradualmente algo del espacio original ocupado por agua.

En una pasta madura, la permeabilidad depende del tamaño, forma y concentración de las partículas de gel y de si los poros capilares se han vuelto o no discontinuos. La tabla IV da los valores del coeficiente de permeabilidad a edades diferentes para una pasta de cemento con una relación agua/cemento de 0.7. La reducción del coeficiente de permeabilidad es más rápida cuanto más baja es la relación agua/cemento de la pasta, de manera que hay pocas reducciones después del curado húmedo durante un período de:

- a) 7 días cuando la relación agua/cemento es 0.45
- b) 28 días cuando la relación agua/cemento es 0.60
- c) 90 días cuando la relación agua/cemento es 0.70

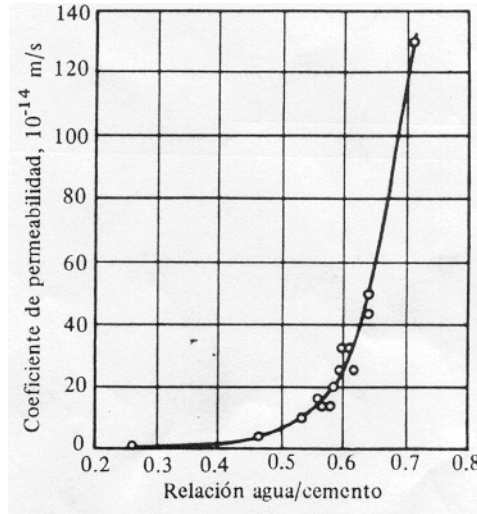
Tabla IV. Reducción de permeabilidad de la pasta de cemento (relación agua/cemento = 0.7) con el desarrollo de la hidratación.

Edad (días)	Coefficiente de permeabilidad, K, m/s
Fresco	$2 \cdot 10^{-6}$
5	$4 \cdot 10^{-10}$
6	$1 \cdot 10^{-10}$
8	$4 \cdot 10^{-11}$
13	$5 \cdot 10^{-12}$
24	$1 \cdot 10^{-12}$
Última	$6 \cdot 10^{-13}$ (calculado)

Fuente: A. M. Neville, **Tecnología del Concreto**, p. 344

Para pastas de cemento hidratadas al mismo grado, la permeabilidad es tanto menor cuanto más alto es el contenido de cemento en la pasta, es decir cuanto más baja es la relación agua/cemento. La figura 9 muestra valores obtenidos para pastas en las cuales el 93% del cemento se ha hidratado.

Figura 9. Relación entre permeabilidad y relación agua/cemento para pastas de cemento maduras (93% de cemento hidratado)



Fuente: A. M. Neville, **Tecnología del Concreto**, p. 343.

La pendiente de la línea es considerablemente inferior para pastas con relaciones agua/cemento debajo de aproximadamente 0.6, es decir, pastas en las cuales algunos poros capilares se han vuelto segmentados. De la figura 9 se puede ver que una reducción en la relación agua/cemento desde, digamos, 0.7, hasta 0.3 reduce el coeficiente de permeabilidad en 3 órdenes de magnitud. La misma reducción ocurre con una relación agua/cemento de 0.7 entre edades de 7 días y un año.

En el concreto, el valor del coeficiente de permeabilidad decrece en forma muy considerable con una disminución en relación agua/cemento: por encima del rango de relaciones agua/cemento de 0.75 a 0.26, el coeficiente decrece hasta 4 órdenes de magnitud, y por encima del rango de 0.75 a 0.45, en 2 órdenes de magnitud. Específicamente, a una relación agua/cemento de 0.75, el coeficiente de permeabilidad es comúnmente 10^{-10} m/s, y esto se consideraría representativo del concreto con alta permeabilidad.

A una relación agua/cemento de 0.45 el coeficiente es comúnmente 10^{-11} ó 10^{-12} m/s; las permeabilidades de un orden de magnitud más abajo que el último valor son consideradas respectivamente de concretos con una permeabilidad muy baja.

En esta relación, es útil otra vez la figura 9 la cual se aplica a pastas de cemento maduro. Hay un aumento grande de la permeabilidad a relaciones agua/cemento que sobrepasan aproximadamente 0.4. En la cercanía de esta relación de agua/cemento, los poros capilares se vuelven segmentados de manera que existe una diferencia considerable de permeabilidad entre pastas de cemento maduro con una relación agua/cemento menor de 0.4 y aquellas con relación agua/cemento mayores. Esta diferencia tiene implicaciones para el ingreso de iones agresivos dentro del concreto. La permeabilidad del concreto es de interés también con relación a la impermeabilidad al agua de estructuras que retienen líquidos y otras estructuras, y también con referencia al problema de presión hidrostática en el interior de presas. Además, el ingreso de humedad dentro del concreto afecta sus propiedades de aislamiento térmico.

Al aumentar de uno a siete días, el período de curado húmedo del concreto con una relación agua/cemento muy alta se halló que se reduce la permeabilidad en un factor de 5.

La permeabilidad del concreto también es afectada por las propiedades del cemento. Para la misma relación agua/cemento, el cemento grueso tiende a producir pasta de cemento endurecido con una porosidad más alta que con un cemento más fino. La composición de compuestos del cemento afecta a la permeabilidad hasta un grado de que tiene influencia en la rapidez de hidratación, pero no se ven afectadas la porosidad y la permeabilidad última.

En términos generales, es posible decir que cuando más alta es la resistencia de la pasta de cemento endurecido, tanto menor es su permeabilidad, un estado de cosas que es de esperarse porque la resistencia es una función del volumen relativo de gel en el espacio disponible para ello. Hay una excepción para esta aseveración: el secado de la pasta de cemento aumenta su permeabilidad, probablemente porque la contracción puede romper algo del gel entre los capilares y así abrir pasos nuevos para el agua.

La diferencia entre la pasta de cemento endurecido y el concreto que contiene una pasta de la misma relación agua/cemento deberá ser apreciada puesto que la permeabilidad del agregado mismo afecta el desarrollo característico del concreto. Si el agregado tiene una permeabilidad muy baja, su presencia reduce el área efectiva a través de la cual puede ocurrir el flujo. Además, puesto que el flujo ha de circular alrededor de las partículas de agregado, la trayectoria efectiva se vuelve considerablemente más larga de manera que el efecto del agregado en la reducción de la permeabilidad puede ser considerable. La zona de interface no parece contribuir al flujo. Generalmente, la influencia del contenido de agregado en la mezcla es muy pequeña y, como las partículas de agregado están envueltas con la pasta de cemento, en el concreto compactado plenamente es la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido la que tiene el efecto más grande sobre la permeabilidad del concreto.

3.6.1 Pruebas de permeabilidad

Las pruebas en el concreto en cuanto a la permeabilidad no se han normalizado en forma general, de manera que el coeficiente de permeabilidad citado en diferentes publicaciones puede no ser comparable.

En estas pruebas, tal como se utilizan, se mide el flujo en estado estacionario del agua a través del concreto causado por un diferencial de presión, y se usa la ecuación de Darcy para calcular el coeficiente de permeabilidad “K” (ver más adelante).

Existen procedimientos para realizar estas pruebas como la *US Bureau of Reclamation* en el procedimiento 4913-92 o las pruebas alemanas DIN 1048-1991. En estas pruebas es alta la presión con la cual el agua es forzada a fluir a través del espécimen de concreto, y esto puede alterar el estado natural del concreto; es también posible el bloqueo de algunos poros por los sedimentos. Además, durante el avance de la prueba, puede ocurrir la hidratación del cemento hasta ese momento sin hidratar, de manera que el valor del coeficiente de permeabilidad calculado decrezca con el tiempo.

El procedimiento 4913-92 del *U.S. Bureau of Reclamation* tiene en cuenta una corrección para la edad del espécimen en prueba, ya que este procedimiento es muy importante para el desarrollo característico del concreto en grandes presas. Por el otro lado, para las estructuras de concreto usuales, el flujo de agua sujeto a una presión alta no es representativo de las condiciones de servicio.

3.6.1.1 Coeficiente de permeabilidad

El flujo en poros capilares del concreto saturado sigue la ley de Darcy en cuanto a flujo laminar a través de un medio poroso:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{K' \rho g}{\eta} \frac{\Delta h}{L} \quad (24)$$

En donde $\frac{dq}{dt}$ es la rapidez de flujo de agua en m³/s, “A” es el área de sección transversal de la muestra en m², “ Δh ” es la caída en altura hidráulica a través de la muestra, medida en m, “L” es el espesor de la muestra en m, “ η ” es la viscosidad dinámica del fluido en Ns/r², “ ρ ” es la densidad del fluido en kg/m³, y “g” es la aceleración debida a la gravedad “m/s²”.

El coeficiente “K’” se expresa entonces en m² y representa la permeabilidad intrínseca del material, independientemente del fluido involucrado.

Puesto que el fluido involucrado es generalmente agua, se puede describir así:

$$K = \frac{K' \rho g}{\eta} \quad (25)$$

El coeficiente “K” se expresa entonces en metros por segundo y se conoce como el coeficiente de permeabilidad del concreto, entendiéndose que se refiere a agua a temperatura ambiente. La última calificación surge del hecho de que la viscosidad del agua cambia con al temperatura. Así, la ecuación de flujo se puede escribir como:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = K \frac{\Delta h}{L} \quad (26)$$

Y cuando se ha alcanzado un estado estacionario de flujo $\frac{dq}{dt}$, “K” se determina directamente.

3.6.2 Prueba de penetración de agua

Hay un problema adicional con la prueba de permeabilidad, a saber, que en concreto de buena calidad, no hay flujo a través del concreto. El agua penetra dentro del concreto hasta cierta profundidad. Valenta¹⁴ ha desarrollado una expresión para convertir la profundidad de penetración del coeficiente de permeabilidad “ K ” (en metros por segundo) equivalente al utilizado en la ley de Darcy:

$$K = \frac{e^2 v}{2ht} \quad (27)$$

En donde “ e ” es la profundidad de penetración del concreto en metros, “ h ” es la carga hidráulica en metros, “ t ” es el tiempo sujeto a prueba en segundos y “ v ” es la fracción del volumen de concreto ocupado por poros.

El valor de “ v ” representa poros discontinuos, tales como burbujas de aire, que no han llegado a llenarse con agua excepto bajo presión y se puede calcular a partir del aumento en masa del concreto durante la prueba, teniendo en cuenta que sólo deberán considerarse los vacíos de la parte del espécimen en que penetra el agua. Comúnmente “ v ” se halla entre 0.02 y 0.06.

La carga hidráulica se aplica por presión y comúnmente varía entre 0.1 y 0.7 MPa. La profundidad de penetración se encuentra mediante la observación de la superficie dividida del espécimen de prueba (estando más oscuro el concreto húmedo) después de un período dado de tiempo. Éste es el valor de “ e ” en la expresión de Valenta que se da arriba.

Es también posible utilizar la profundidad de penetración del agua como una valoración cualitativa del concreto: una profundidad de menos de 50mm clasifica al concreto como impermeable; una profundidad de menos de 30mm, como impermeable en condiciones agresivas.

4. ENSAYOS A REALIZAR

4.1 Descripción del trabajo experimental

La parte experimental consta tanto de trabajos preliminares como el análisis de agregados y diseño de mezclas, hasta los trabajos principales como el ensayo de compresión de cilindros, observación en microscopio y el ensayo de absorción, estos últimos se desarrollarán en muestras de concreto endurecido a los 28 días y para lo cual se prepararán probetas según los indican las normas. Los ensayos se realizaron basándonos en las normas americanas ASTM. Durante el desarrollo de este capítulo se describirán más a fondo cada una de las partes del trabajo que se realizaron.

4.2 Ensayos realizados

Los ensayos realizados son:

- Caracterización física de los agregados tanto grueso como fino
- Diseño de mezclas
- Preparación de muestras para observación y absorción
- Ensayo de observación en microscopio
- Ensayo de absorción

4.3 Caracterización física de los agregados

Este ensayo se realizó según la norma ASTM C 33 que describe la forma en que se deben ensayar los agregados tanto finos como gruesos, indicando los límites en que se deben encontrar los resultados para poderlos utilizar en la elaboración de concreto, los agregados que se utilizaron son:

- Arena
- Piedrín de $\frac{3}{8}$ "
- Piedrín de 1"

4.3.1 Pruebas

Las pruebas que se practicaron a los agregados son las siguientes (se indican cuales se practicaron a cada agregado)

- Porcentaje de humedad, (finos y gruesos)
- Porcentaje de absorción, (finos y gruesos)
- Peso específico, (finos y gruesos)
- Pesos unitarios sueltos, (finos y gruesos)
- Pesos unitarios compactados, (finos y gruesos)
- Porcentaje que pasa tamiz núm. 200, (finos y gruesos)
- Porcentaje de vacíos, (finos y gruesos)
- Módulo de finura, (sólo finos)
- Materia orgánica, (sólo finos)
- Porcentaje partículas planas y alargadas (sólo gruesos)
- Granulometría, (finos y gruesos)

4.4 Diseño de mezclas

Con los datos del análisis de los agregados se procedió a diseñar las mezclas. Se diseñaron 7 mezclas de concreto con una variación en la relación agua/cemento (a/c) de 0.05, empezando desde una relación de 0.4 hasta una relación de 0.7. Se mantuvieron fijas muchas variantes en las mezclas, como por ejemplo mismos agregados, mismo tipo de cemento, mismas condiciones de curado, esto con el fin de que no afectaran los resultados que se pretenden obtener, que es la variación de la porosidad en función de la relación agua/cemento (a/c).

El diseño de mezclas se realizó como lo indica el método ACI para mezclas de concreto.

A las mezclas frescas se les tomaron los siguientes datos.

- Asentamiento inicial (cono de Abrams)
- Peso unitario
- Porcentaje de aire incluido
- Trabajabilidad
- Plasticidad
- Apariencia
- Exudación.

4.5 Elaboración de muestras

Se realizaron 6 cilindros por cada mezcla, de los cuales tres cilindros se ensayaron a compresión, y el resto se usaron para realizar las pruebas de absorción y observación directa en el microscopio, los cilindros se realizaron según la norma ASTM C 39 que indica dicho procedimiento.

Las muestras que se utilizaron para los ensayos de porosidad son las siguientes.

Para la prueba de absorción, se cortó de los cilindros una sección de concreto paralela a las capas de fundición con una altura de entre 1" a 1 ¼" que aproximadamente da el peso mínimo para este ensayo, que es 850 g., (según la norma ASTM C 642-97)

En los ensayos de observación por microscopio, también se cortaron pastillas como las que se utilizarán en la prueba de absorción, de las cuales se cortaron secciones de aproximadamente 4" * 2" y un espesor de ½". Una de las caras de mayor área se pulió para observarla en el microscopio. La forma de pulir la sección fue pasarla por lijas o abrasivos cada vez más finos, empezando con un núm. 100, luego con un núm. 200, y sucesivamente hasta un núm. 800, para que la superficie estuviera lista y se pudiera observar en el microscopio, (según norma ASTM C 457-82 o la norma ASTM 856 de análisis de agregados).

4.6 Ensayo de muestras

Los ensayos que se realizaron a los concretos diseñados son los siguientes.

4.6.1 Ensayo a compresión

Este ensayo se realizó a los 28 días de fraguado el concreto, para poder encontrar la resistencia del concreto a compresión (f_c), (según la norma ASTM C 39), se le aplicó una velocidad de 1,000 libras/segundo y se hicieron fallar los cilindros.

4.6.2 Ensayo de absorción

Este ensayo se realizó siguiendo la norma mencionada en la preparación de la muestra, y consistió en pesar las muestras para el efecto y meterlas a un horno a una temperatura de 100° a 110° por no menos de 24 h., hasta que la muestra estuviera completamente seca, se obtuvo su peso (se le llamó peso A). Luego se sumergió en agua por no menos de 48 h., hasta que estuviera completamente saturada y se obtuvo su peso (se le llamó peso B). Se sumergió en agua hirviendo por un lapso de 5 h., se esperó 14 horas para que refrescara, se secó la superficie con una toalla y se pesó (se le llamó peso C), y por último se suspendió la muestra dentro del agua y se pesó (se le llamó peso D).

4.6.3 Ensayo de observación directa

Para el ensayo se utilizó un microscopio petrográfico, con una magnificación de 40X como lo describe la respectiva norma. De la sección pulida se observó una sección de $4.5 * 1.5$ cms., la cual se subdividió en cuadrícula de $3*3$ mm., para que sea observable en el lente del microscopio, y se contaron los poros grandes en la sección observada.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los resultados de los ensayos son los siguientes.

5.1 Ensayos de agregados

- Porcentaje de humedad, se tomaron los días en que se realizaron las mezclas y fueron los siguientes.

Tabla V. Porcentaje de humedad de los agregados

	Porcentaje de humedad	
	Día 1	Día 2
Arena	6.81	7.27
Piedrín $\frac{3}{8}$ "	4.17	3.01
Piedrín 1"	1.29	2.63

- El resumen de los resultados restantes practicados a los agregados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla VI. Resultados de los análisis de agregados

	Arena	Piedrín ¾"	Piedrín 1"
Porcentaje absorción	0.81	1.01	1.21
Peso específico (kg/m ³)	2.7	2.67	2.7
Pesos unitarios sueltos (kg/m ³)	1241	1410	1432
Pesos unitarios compactados (kg/m ³)	1580	1585	1564
Porcentaje pasa tamiz núm. 200	2	2	0.83
Porcentaje de vacíos	41.5	40.64	42.07
Módulo de finura	2.61	***	***
Materia orgánica	1	***	***
Porcentaje de partículas planas y alargadas	***	4	4

5.2 Resultados de la mezcla fresca

Tabla VII. Relaciones A/C

Mezcla A	Relación A/C 0.40	Cilindro del T01 al T06
Mezcla B	Relación A/C 0.45	Cilindro del T07 al T12
Mezcla C	Relación A/C 0.50	Cilindro del T13 al T18
Mezcla D	Relación A/C 0.55	Cilindro del T19 al T24
Mezcla E	Relación A/C 0.60	Cilindro del T25 al T30
Mezcla F	Relación A/C 0.65	Cilindro del T31 al T36
Mezcla G	Relación A/C 0.70	Cilindro del T37 al T42

Tabla VIII. Datos de mezclas frescas

Mezcla	A	B	C	D	E	F	G
Asentamiento (pg.)	4.25	5.25	6.5	8	8.25	8.25	7.75
Peso unitario (kg./m ³)	2,332	2,332	2,326	2,338	2,338	2,338	2,346
Porcentaje Aire incluido	2.5	2.6	2.6	1.7	1.6	1.4	1.6
Trabajabilidad	3	3	3	3	3	3	3
Plasticidad	2	2	2	2	2	3	2
Apariencia	4	4	4	4	4	4	4
Exudación	3	3	3	3	3	3	2

Trabajabilidad: (1 poca, 2 regular, 3 buena)

Plasticidad: (1 baja, 2 regular, 3 alta)

Apariencia: (1 segregada, 2 sangrada, 3 pastosa, 4 buena)

Exudación: (1 alta, 2 regular, 3 baja)

5.3 Resultados de ensayos a compresión

Tabla IX. Datos de ensayos a compresión

Cilindro	Diámetro	Carga (l.)	f'c (kg./cm ²)	f'c Prom (kg./cm ²).
T1	6.002	162170	402.98	411.71
T2	6.009	167515	415.37	
T3	6.112	173930	416.79	
T7	6.001	138750	344.90	353.42
T8	5.996	143885	358.32	
T9	6.003	143725	357.03	

Cilindro	Diámetro	Carga (l.)	f'c (kg./cm ²)	f'c Prom (kg./cm ²).
T13	5.988	133265	332.76	323.65
T14	5.989	124705	311.23	
T15	6.001	131535	326.97	
T19	6.000	102830	255.70	255.41
T20	6.007	104290	258.77	
T21	6.000	101230	251.76	
T25	5.980	91975	230.24	224.36
T26	6.024	89420	220.58	
T27	6.001	89415	222.27	
T31	6.022	83020	204.93	198.09
T32	5.991	78475	195.72	
T33	6.001	77890	193.62	
T37	6.008	75590	187.46	186.76
T38	6.009	74130	183.78	
T39	6.000	76020	189.03	

Como se ensayaron 3 cilindros a compresión, se tomará como resultado el promedio de cada unos de los datos.

5.4 Resultados del ensayo de absorción

En este ensayo se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla X. Datos de ensayos por absorción

Cil.	A	B	C	D	GE	%ABS	%VAC
T5	1170	1250	1252	730	2.657	6.838	15.697
T10	1285	1383	1386	803	2.666	7.626	17.324
T18	1248	1348	1350	783	2.684	8.013	17.989
T23	975	1057	1058	606	2.644	8.410	18.371
T29	1190	1295	1296	755	2.736	8.824	19.593
T35	1185	1296	1297	755	2.756	9.367	20.668
T42	1215	1330	1332	778	2.777	9.465	21.100

- A Peso de la muestra después de secarse en el horno (g.)
- B Peso de la muestra después de inmersión en el agua (g.)
- C Peso de la muestra después de ser hervida la muestra (g.)
- D Peso de la muestra en agua (g.)
- GE Gravedad específica del concreto (g./cm³)
- %ABS Porcentaje de absorción
- %VAC Porcentaje de poros permeables

5.5 Resultado del ensayo de observación

Según la observación que se realizó se hizo el siguiente conteo.

Tabla XI. Datos de ensayos de observación en microscopio

Cil.	T5	T10	T18	T23	T29	T35	T42
núm. Poros	86	119	165	98	282	338	186

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

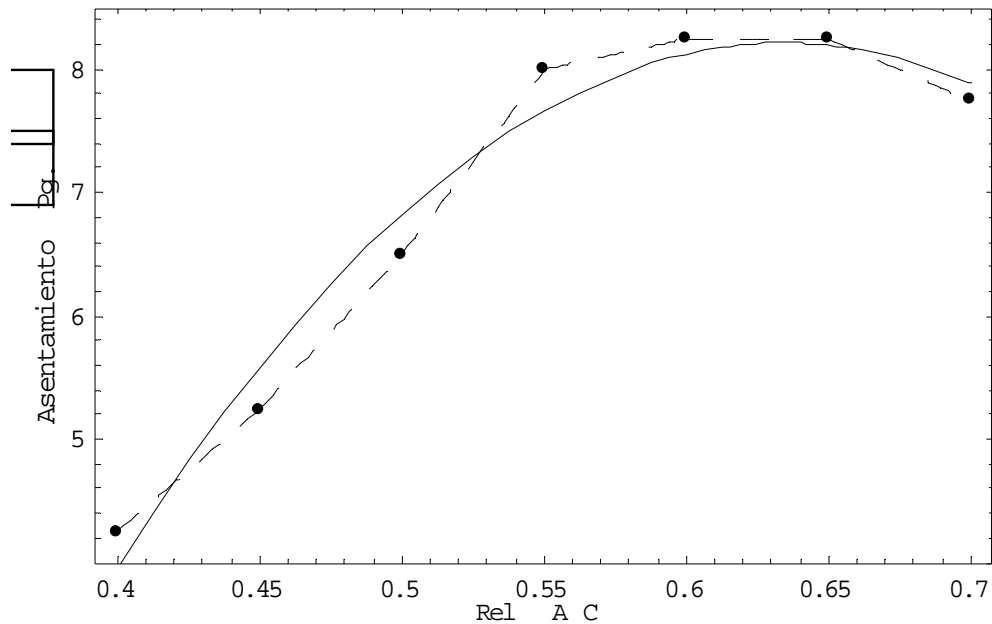
Se realizará un análisis global de los datos obtenidos durante el desarrollo de la parte experimental de este trabajo, empezando desde los datos iniciales del concreto fresco, y posteriormente se realizará un análisis utilizando esos datos conjuntamente con los obtenidos en los ensayos en los que se obtuvieron datos entorno a la porosidad del concreto.

Análisis de los resultados del concreto fresco y su resistencia a la compresión

En la figura 10 se puede observar la relación que hubo entre la relación agua/cemento (A/C) y el asentamiento inicial del concreto fresco.

Se llega a la conclusión que los primeros puntos que corresponden al asentamiento del concreto de relaciones A/C entre 0.40 y 0.55 tienen la misma tendencia, luego en las relaciones A/C desde 0.60 en adelante, el asentamiento empezó a disminuir y en el último punto el asentamiento disminuyó de forma negativa. Esto puede explicarse puesto que existió una pérdida de humedad en los agregados por el tiempo que esperaron para la hora de realización de la mezcla, pero no influyó mucho en los demás resultados tal como se verá más adelante.

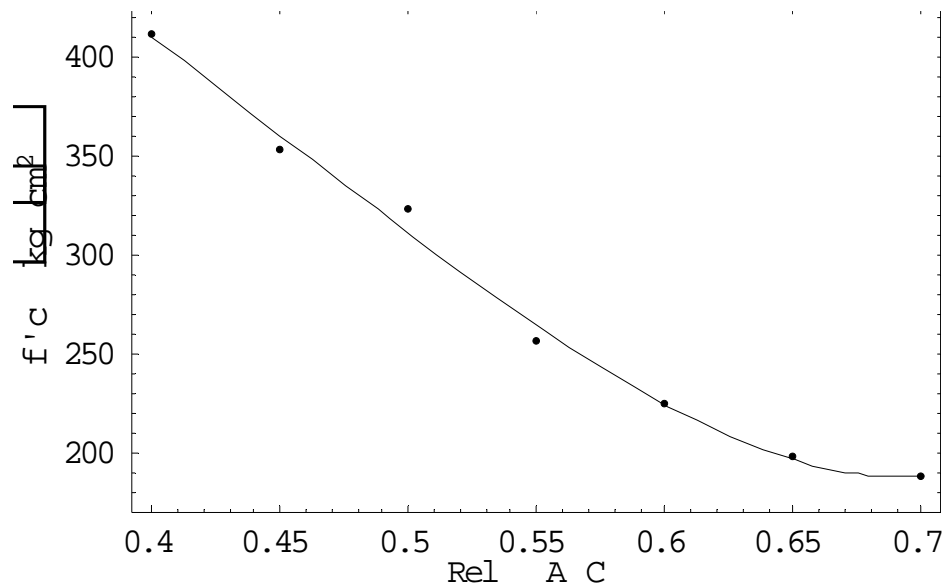
Figura 10. Relación agua/cemento (A/C) vrs. asentamiento inicial del concreto fresco.



La línea punteada es la unión de los puntos encontrados al hacer las mediciones, y la línea continua indica una regresión cuadrática que se dedujo de los datos encontrados, la ecuación es $y = -22.9107 + 98.1548x - 77.381x^2$.

En lo que corresponde a la resistencia del concreto a la compresión ($f'c$) los resultados se pueden apreciar en la figura 11, y como única conclusión se dice que cumple lo ya investigado al respecto, o sea que la resistencia a compresión depende de la relación agua/cemento A/C.

Figura 11. Relación agua/cemento (A/C) vrs. resistencia a la compresión (f'c) a los 28 días.



La línea continua muestra una regresión de cuarto orden que se realizó con los datos obtenidos y la ecuación que resultó es:

$$y = 909.242 - 2548.77x + 729559x^2 - 13820x^3 + 9278.79x^4$$

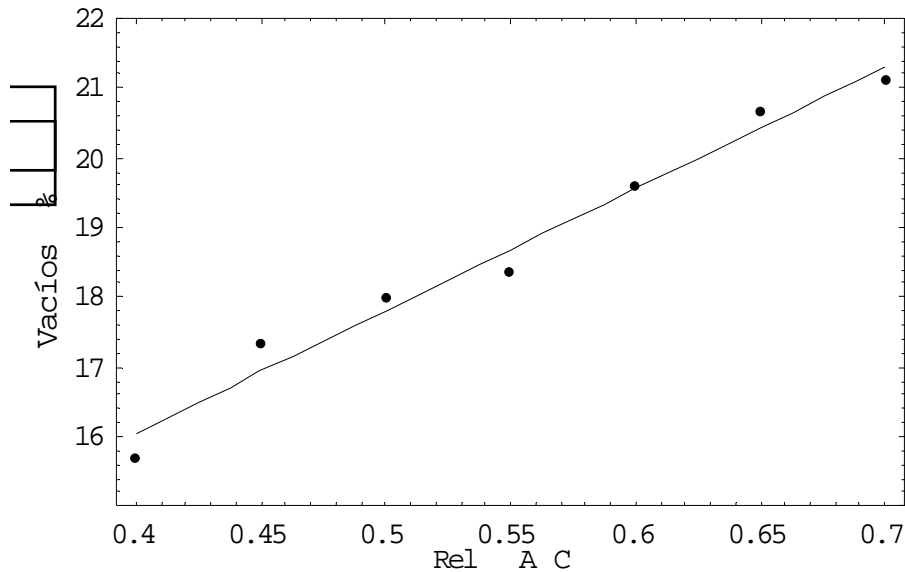
6.2 Análisis de los resultados del ensayo de absorción

En las figuras 12, 13 y 14 se mostrará como varió el porcentaje de absorción (%) del concreto con respecto a la relación agua/cemento A/C y como se cambió con respecto al asentamiento inicial del concreto fresco.

En lo que se refiere a la relación agua/cemento A/C el porcentaje de absorción tuvo una tendencia similar en todos los casos, y esto lo demuestra la

figura 12 en la cual únicamente una regresión lineal fue necesaria para poder acoplar todos los datos y sin mayor dispersión.

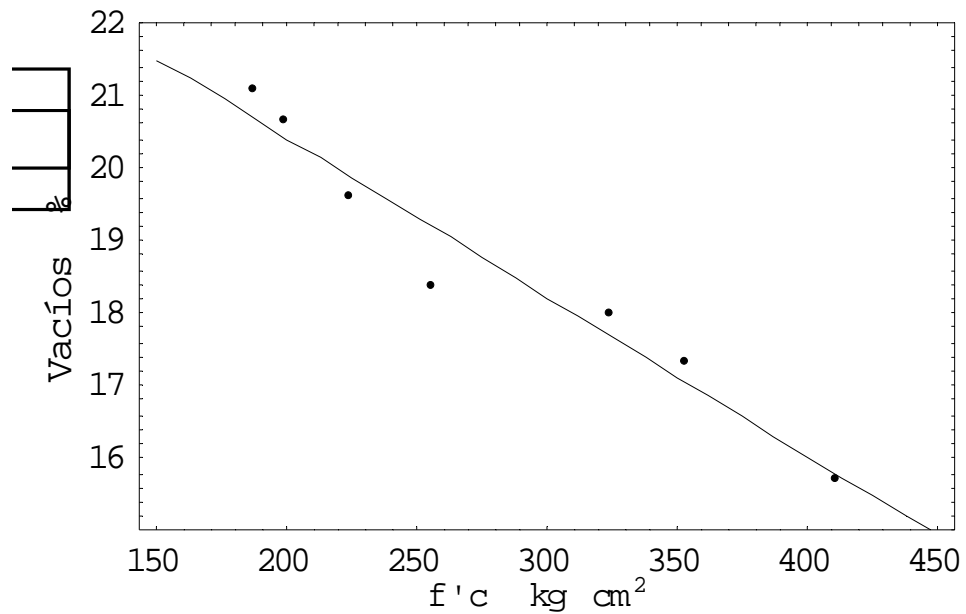
Figura 12. Relación agua/cemento (A/C) vrs. porcentaje de vacíos (%).



La línea continua muestra una regresión lineal, cuya ecuación es:
 $y = 9.05204 + 17.5007x$

El porcentaje de absorción con respecto a la resistencia a compresión del concreto a los 28 días al igual que en la relación A/C tuvo una distribución similar en todos los casos, ya que también sólo una regresión lineal fue necesaria para poder relacionar todos los datos obtenidos aunque se puede observar que existe más dispersión, pero no influye en gran manera. Esto lleva a concluir que tanto la relación agua/cemento A/C y la resistencia a la compresión f'_c del concreto se relacionan similarmente con la absorción del concreto y esto da un índice de que la porosidad varía igualmente con los datos mencionados.

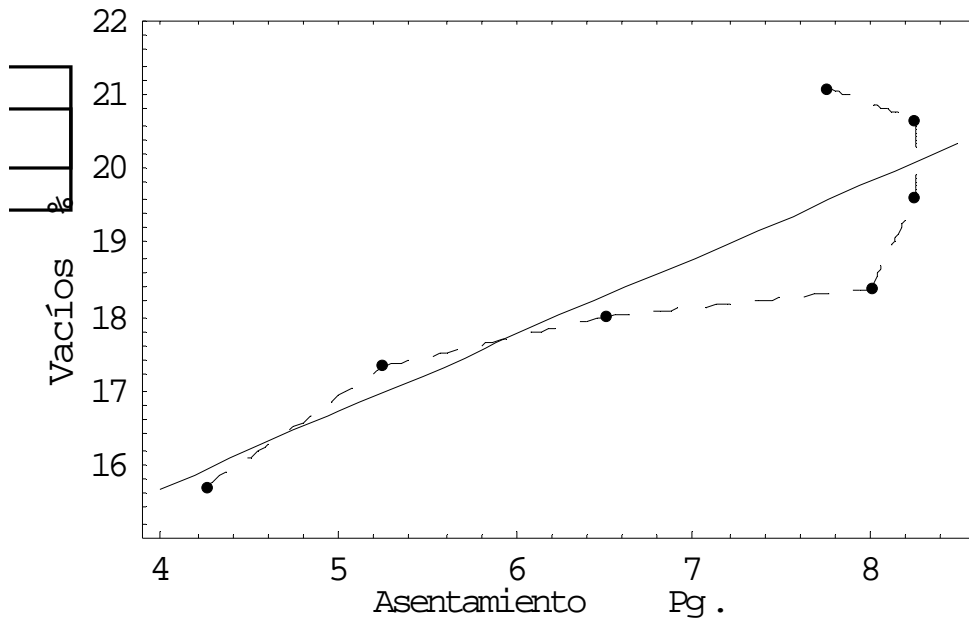
Figura 13. Relación $f'c$ vrs. porcentaje de vacíos (%).



La línea continua muestra una regresión lineal, cuya ecuación es:
 $y = 24.7657 - 0.0218174x$

Cuando se relaciona el asentamiento inicial y el porcentaje de vacíos (%) en una gráfica se puede observar que existe gran dispersión no por parte del porcentaje de vacíos, sino del asentamiento que tuvo el concreto fresco, aunque se puede observar que en los primeros 5 asentamientos la relación que hubo fue aceptable, no así en los 2 últimos asentamientos ya que son los que se salen de la tendencia que traían los datos anteriores, en la figura 14 se observa dicha relación.

Figura 14. Asentamiento vrs. porcentaje de vacíos (%).



La línea punteada es la unión de los puntos encontrados al hacer mediciones y la línea continua indica una regresión lineal que se dedujo de los datos encontrados, la ecuación es $y = 11.5308 + 1.03681x$

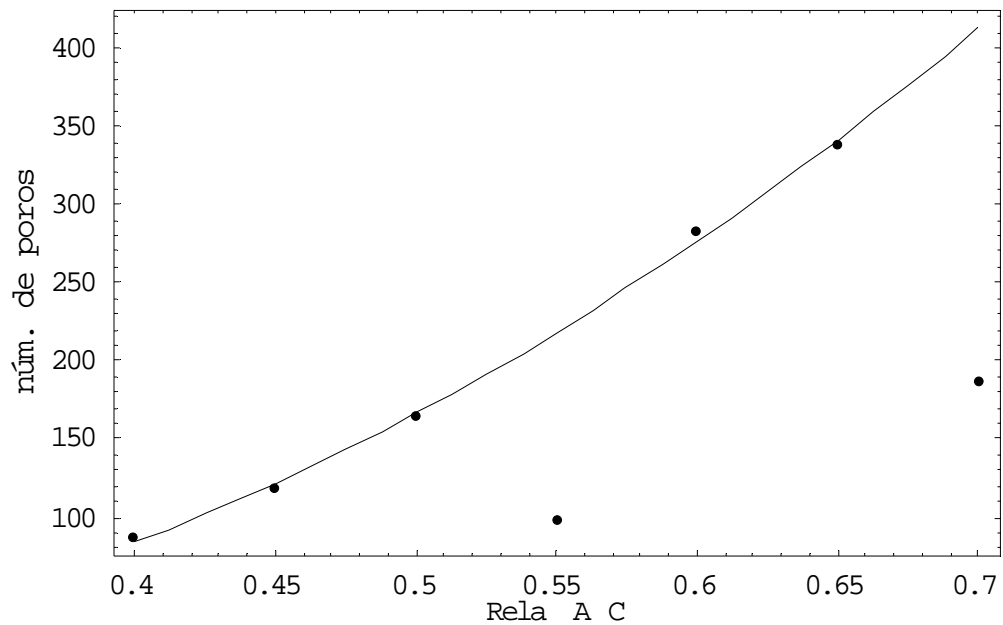
6.3 Análisis de los resultados de la observación directa en microscopio

Por las limitantes que se tuvieron cuando se realizó este ensayo, los datos que se obtuvieron no dan indicaciones muy aproximadas a la porosidad del concreto. El objetivo principal de este ensayo era averiguar cómo se distribuye la porosidad y la tendencia del diámetro de los poros observados, pero como no se pudo realizar, los datos obtenidos se relacionarán con datos importantes de los concretos que se diseñaron.

Vale la pena mencionar que de los datos de la observación existen dos conteos que se salen completamente de la tendencia de las otras mezclas, esto se debe a que cuando se escogieron las secciones para ser observadas, se hizo sobre agregados y como éstos no tenían mayor número de poros, variaron los resultados, pero los demás datos tienen la misma tendencia.

Si graficamos la relación agua/cemento A/C con el número de poros encontrados en la sección pulida de cada muestra, se observa que tiene una tendencia muy apegada a la regresión cuadrática que se hizo. Además, se debe mencionar que para realizar dicha regresión se descartaron los datos que se salen de la tendencia de los otros.

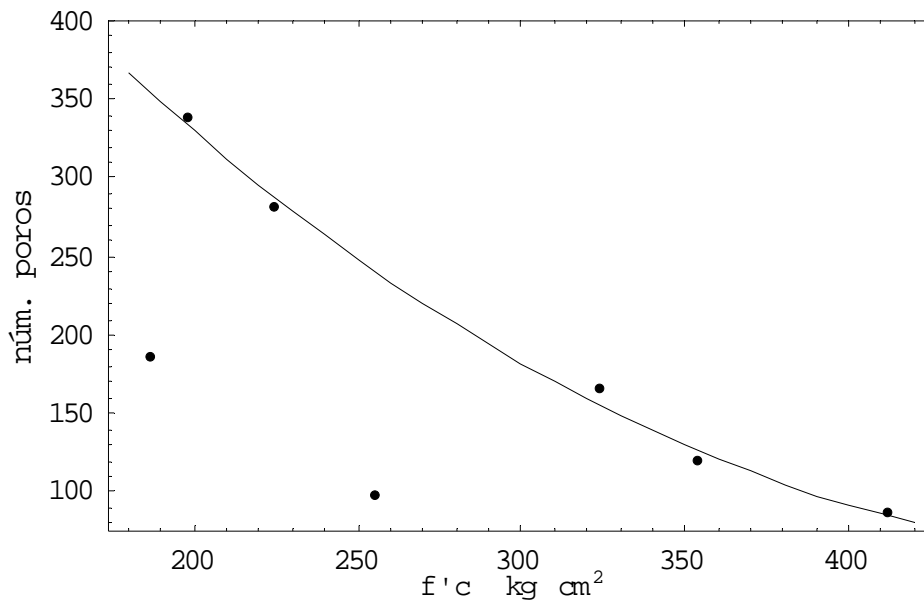
Figura 15. Relación A/C vrs. núm. de poros observados.



La línea continua muestra una regresión cuadrática, cuya ecuación es:
 $y = 17.0227 - 364.448x + 1327.92x^2$

Si se relaciona la resistencia a la compresión del concreto y el conteo de poros que se hizo utilizando el microscopio, por medio de una regresión cuadrática se pueden unir con muy poca dispersión. Esto indica que al igual que en el porcentaje de absorción, el conteo de poros se relaciona de forma similar con la relación A/C y la resistencia $f'c$, con la diferencia que en el porcentaje de absorción es una relación lineal y en la resistencia a la compresión es con una relación de segundo orden. Al igual que en el caso anterior, para poder obtener la regresión se eliminaron los datos que salen de la tendencia de los otros.

Figura 16. Resistencia a la compresión vrs. núm. de poros observados.



La línea continua muestra una regresión cuadrática cuya ecuación es:
 $y = 800.058 - 2.92687x + 0.0028909x^2$

6.4 Limitantes de los ensayos

En la realización de los ensayos se encontraron muchas limitantes, las cuales impidieron que se realizaran los mismos al pié de la letra como lo indica su respectiva norma. Estas dificultades se encontraron en los ensayos de absorción y observación directa en microscopio, aunque en el ensayo que más obstáculos tuvo fue el de observación directa en microscopio, esto debido a que el equipo que se tenía no era el adecuado para llevar a cabo el ensayo, ya que se necesita equipo adicional al que se tiene en Guatemala. Las principales limitantes en este ensayo fueron.

- a) A la hora de desarrollar este ensayo el primer problema que se encontró fue que se necesitaba una plataforma o carro, que debía portar la muestra que se estaba observando. Los movimientos de esta plataforma tenían que ser medidos de forma micrométrica, porque se necesitaba medir la distancia que se recorría sobre la pasta de cemento que no tenía poros (o sea la distancia entre los poros) y la distancia que se recorría sobre los poros, lo cual era de tamaño micrométrico por el diámetro de los poros.
- b) En la resolución o magnificación del microscopio se utilizó 40X y con ello no se pudo ver poros más pequeños, se hubiera necesitado un microscopio con una magnificación de 100X ó 125X con lo cual ya se verían los poros de menor tamaño. Una prueba de ello fue que se tomó un rapidógrafo con tinta china y se trazaron líneas sobre la superficie y observando en el lente del microscopio, que cuando se pasaba el

rapidógrafo sobre la pasta de cemento la tinta era succionada o absorbida, lo que indica que existían poros de menor tamaño que no se observaban en el lente del microscopio.

Dichos poros eran los que absorbían la tinta, lo contrario sucedía cuando la tinta se vertía sobre un agregado, la cual se quedaba reposada en la superficie del agregado y esperaba a que se secara, lo que indicaba que no existían poros.

En el ensayo de absorción la limitante encontrada fue la precisión de la balanza, aunque sí se pudo trabajar a cabalidad y dio datos que se pueden comparar, estos datos hubieran podido ser más exactos si la balanza utilizada hubiera sido de más alta precisión, pero esto no fue un inconveniente mayor para poder realizar este ensayo.

En la realización del diseño de mezclas y el concreto no hubo inconveniente alguno, ya que la empresa que brindó apoyo en la realización de las mismas, contaba con equipo adecuado para realizar los ensayos.

CONCLUSIONES

1. Los datos estuvieron bastante exactos cuando se relacionó la resistencia a la compresión ($f'c$) y la relación agua/cemento (A/C), lo cual indica que las variaciones que existieron en el asentamiento inicial no influyeron en la resistencia a compresión ($f'c$).
2. En el análisis de los resultados de la observación directa por medio de microscopio fue muy acertado anular los datos que se salían de la tendencia de los demás valores, esto condujo a obtener relaciones muy aproximadas con los datos que se relacionaron.
3. La relación que se obtuvo entre el número de poros observados en el microscopio y la relación A/C así como la resistencia a la compresión son muy similares, con lo cual se puede corroborar la teoría estudiada con antelación.
4. De la misma forma que en la observación, la absorción arrojó datos muy importantes y muy apegados a las regresiones matemáticas que se hicieron, no encontrando mayor dispersión en los resultados.
5. Las limitaciones que existieron para realizar los ensayos, en especial la observación directa por microscopio, impidieron obtener resultados más completos de este procedimiento.

RECOMENDACIONES

1. Elaborar ensayos con la intrusión de mercurio, ya que es el método más exacto que existe para calcular la porosidad del concreto aunque tiene la limitación de ser muy costoso.
2. Las limitaciones que se tuvieron en el método de observación directa por la falta de equipo adecuado pueden ser disminuidas adaptado equipo similar al que se describe en las normas.
3. Elaborar ensayos de permeabilidad en el concreto utilizando normas americanas o alemanas, que son las más utilizadas ya que están muy relacionadas a la porosidad.
4. Realizar un estudio de la porosidad en función del tiempo, ya que con el avance del mismo el cemento que no había reaccionado lo hace y se altera el volumen ocupado por los poros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. www.selladoresdeconcreto.com/vt11.ttm, mayo del 2003.
2. IUPAC, **Manual of Symbol and Terminology**, *Pure Appl. Chemistry*, apéndice 2, parte 1, 1972 p.31.
3. Skalny Jan, and Mindess Sidney, **Materials Science of Concrete II**, *The American Ceramic Society, Inc.*, 1991, p.89
4. Cook Raymond, and Hover Kenneth, **Mercury Porosimetry of Cement-Based Materials Correction Factors**, *ACI Material Journals*, Vol. 90, No. 2, march-april 1993, p.152.
5. Ibid., p.154.
6. Skalny Jan, and Mindess Sidney, op. cit., p.92
7. Loc. Cit.
8. Ibid., p.96
9. Loc. Cit.
10. Ibid., p.101
11. Mehta, Kumar, and Monteiro Paulo, **CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales**, México, IMCYC, 1998, p.34.
12. Neville, A. M., **Tecnología del concreto**, México, INCYC, 1999, p.338
13. Ibid., p.341
14. Ibid., p.345

BIBLIOGRAFÍA

ASTM C-457-98, **Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete**, American Society for Testing and Materials, USA, 1998.

COGUANOR NGO 41 006, **Terminología referente al hormigón y a los agregados para hormigón**, Ministerio de Economía, Guatemala, C. A., 1996

COOK RAYMOND, AND HOVER KENNETH, **Mercury Porosimetry of Cement-based Materials and Associated Correction Factors**, American Concrete Institute Materials Journal, USA, Vol. 90 No. 2, marzo-abril 1993.

DICCIONARIO DE LA REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, Vigésimo Primera Edición, Tomo 1 y 2, Madrid España, 1997.

MEHTA KUMAR, MONTEIRO PAULO, **CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., México, IMCYC, 1998.

NAWY, EDWARD, **CONCRETO REFORZADO un enfoque básico**, Editorial Prentice Hall, México, 1998

NEVILLE, Adam, **Tecnología del concreto**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., México, IMCYC, 1999

www.construaprende.com/Lab/18/Prac18_1.html, mayo del 2003.

www.construaprende.com/trabajos/T2/T2Pag10.html, mayo del 2003.

www.construaprende.com/trabajos/T2/T2Pag20.html, mayo del 2003.

www.monografías.com/trabajos4/concreto/concreto/shtml, mayo del 2003.

www.selladoresdeconcreto.com/vt11.htm, mayo del 2003

SKALNY JAN, AND MINDESS, **Materials, Science of Concrete II**, The American Ceramic Society, Inc, Pennsylvania USA, 1991.

PRIMERA PARTE

MARCO TEÓRICO

SEGUNDA PARTE

MARCO EXPERIMENTAL

ANEXOS