

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES

1.1. EL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes

El hormigón es un material compuesto por “aglomerados y aglomerantes”, el primero está constituido por los agregados pétreos que permite formar una pasta moldeable y consistente; el segundo está compuesto por agua y cemento, esta combinación reacciona químicamente logrando así el endurecimiento.

En nuestro país el hormigón, es uno de los principales materiales utilizados en la construcción de obras civiles. Entre sus propiedad está la resistencia a esfuerzos de compresión y tracción, teniendo amplia ventaja su resistencia a compresión. Otra propiedad es la permeabilidad al agua y a otros líquidos más agresivos.

Como sólo se tiene conocimientos empíricos, y al no conocer a ciencia cierta las características internas del hormigón no se prevé los problemas que estas pueden acarrear a las propiedades más importantes del hormigón tal es el caso del porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado y adherencia pasta-agregado, que afectan directamente a la resistencia y permeabilidad del hormigón.

1.1.2. Planteamiento

En general se tiene un insuficiente conocimiento de las características internas del hormigón tales como: 1) el contacto agregado-agregado, 2) porcentaje de vacíos y 3) adherencia pasta-agregado. Dichas características afectan al hormigón en:

- Los vacíos reducen la resistencia del hormigón. Se dice que por cada 1% de aire atrapado, la resistencia se reduce en 5 o 6 %.

- La permeabilidad aumenta cuando hay más vacíos que, a su vez reduce la durabilidad. Si el hormigón no es compacto e impermeable, no será resistente al agua, ni capaz de soportar líquidos más agresivos, además de que cualquier superficie expuesta sufrirá más los efectos de la intemperie y aumentara la probabilidad de que la humedad y el aire entren al hormigón.
- Los vacíos reducen el contacto agregado-agregado; por lo que no se obtendrá la adherencia requerida y el hormigón no será tan resistente como debiera.

1.1.3. Formulación

En el planteamiento de este trabajo surge la siguiente pregunta como punto de partida de la investigación:

¿Cómo realizar el análisis de contacto agregado-agregado, el porcentaje de vacíos y la adherencia pasta-agregado de la mezcla de hormigón?

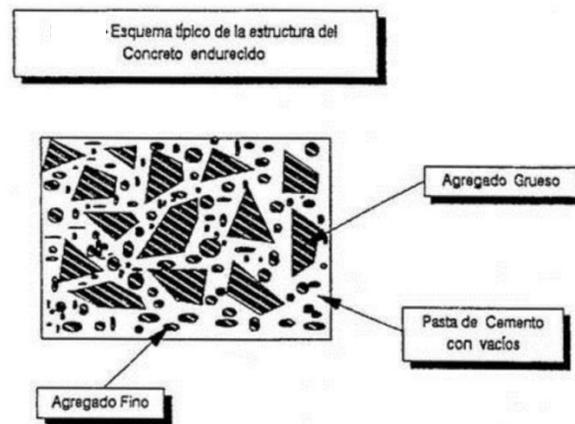
1.1.4. Sistematización

Para poder conocer las características internas del hormigón tales como: 1) contacto agregado-agregado, 2) porcentaje de vacíos y 3) adherencia pasta-agregado, se analizarán las imágenes obtenidas mediante la tomografía computarizada en Rayos-X utilizando el programa eFilm Lite.

Variables independientes:

Características internas del hormigón:

Figura 1. Esquema típico de la estructura del hormigón endurecido.



Fuente: *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 28 No. 2*

En la figura se puede apreciar el esquema típico de la estructura interna del hormigón endurecido, que consiste en aglomerante, estructura básica o matriz, constituida por la pasta de cemento y agua, que aglutina a los agregados gruesos, finos, aire y vacíos, estableciendo un comportamiento resistente debido en gran parte a la capacidad de la pasta para adherirse a los agregados y soportar esfuerzos de tracción y compresión, así como a un efecto puramente mecánico propiciado por el acomodo de las partículas inertes y sus características propias.

Un aspecto sumamente importante en la estructura del hormigón endurecido reside en la porosidad o sistema de vacíos. Gran parte del agua que interviene en la mezcla, solo cumple la función de lubricante en el estado plástico, ubicándose en líneas de flujo y zonas de sedimentación de los sólidos, de manera que al producirse el endurecimiento y evaporarse, quedan los vacíos o poros, que condiciona el comportamiento posterior del hormigón para absorber líquidos y su permeabilidad o capacidad de flujo a través de él.

Imágenes de tomografía computarizada en Rayos-X: La tomografía computarizada con rayos-X es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos. Su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas de hormigón, en particular en lo concerniente a la determinación de la

estructura de vacíos (tamaño, distribución y conectividad) y al análisis de transporte de agua al interior del material.

Alternativas de solución.

Métodos analíticos: existen diversas técnicas que pueden ser útiles para el análisis de las características internas del hormigón endurecido estas técnicas son las siguientes:

Técnicas de captura de imágenes bidimensionales:

- Inspección visual.
- Método de potencial eléctrico de media celda.
- Métodos basados en ondas elásticas.
- Georradar.
- Termografía infrarroja.
- Reconstrucción de imágenes generadas con Tomografía Computarizada en Rayos-X.

Métodos empíricos: una solución o modelo empírico es el que se basa en la observación o el experimento y no deriva de la teoría. Se ajusta a los hechos observados y permite predecir lo que sucederá en ciertas circunstancias, porque ya se sabe lo que ha sucedido antes en esas mismas condiciones. La confiabilidad de estos métodos depende de la base de datos experimentales; podría decirse que “esto va suceder con toda seguridad” (porque siempre es así), o que “probablemente sucederá” (porque suele ser así), o que “podrá suceder” (porque a veces sucede).

Alternativa seleccionada

De las alternativas planteadas se opta por analizar las características internas del hormigón endurecido como: 1) contacto agregado-agregado, 2) porcentaje de vacíos y 3) adherencia pasta-agregado mediante un método analítico que es el de analizar las imágenes generadas por la Tomografía Computarizada en Rayos-X.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. General

Tener un conocimiento acertado sobre de las características internas del hormigón endurecido como: 1) contacto agregado-agregado, 2) porcentaje de vacíos y 3) adherencia pasta-agregado, mediante el análisis de imágenes internas de probetas de hormigón obtenidas por Tomografía Computarizada en Rayos-x.

1.2.2. Específicos.

- Determinar las características de los vacíos (tamaño).
- Analizar el contacto agregado-agregado.
- Conocer la adherencia pasta-agregado
- Comparar los resultados experimentales obtenidos con los conocimientos empíricos y así evaluar si son acertados o no.
- Evaluar cómo afecta la forma y texturas del agregado grueso al contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y adherencia pasta-agregado y estas a su vez como afectan a la resistencia y permeabilidad del hormigón.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

Las razones por las cuales se realiza este trabajo de investigación son las siguientes.

1.3.1. Teórica

El trabajo de investigación propone en función a teorías existentes, aportar con innovaciones tecnológicas, para enriquecer conocimientos, en las características internas del hormigón endurecido.

1.3.2. Metodológica

A través del análisis de las imágenes de la Tomografía Computarizada en Rayos-X, metodológicamente se pretende obtener valores y rangos que sirvan de fundamento para que, en base a los resultados obtenidos y los análisis realizados, se pueda realizar la correcta utilización de una filosofía de diseño de mezclas de hormigón y obtener rendimientos óptimos.

1.3.3. Práctica

Prácticamente al tener conocimientos más precisos de las características internas del hormigón endurecido como: 1) contacto agregado-agregado, 2) porcentaje de vacíos y 3) adherencia pasta-agregado, efectivamente se construirán estructuras más confiables, durables y resistentes.

1.4. HIPÓTESIS

El análisis de las imágenes obtenidas de la Tomografía Computarizada en Rayos-X dan resultados más acertados sobre de las características internas del hormigón endurecido como: 1) contacto agregado-agregado, 2) porcentaje de vacíos y 3) adherencia pasta-agregado.

1.5. ALCANCE Y/O RESTRICCIONES

Con esta investigación se pretende presentar el avance internacional reciente en la aplicación de Tomografía Computarizada con Rayos-X y del Sistema de Imágenes para la caracterización de la estructura interna del hormigón endurecido, para tener conocimientos acertados del contacto agregado-agregado, porcentaje de vacíos y adherencia pasta-agregado.

CAPÍTULO 2

**MARCO
TEÓRICO**

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Descripción del material a estudio: hormigón. Principales patologías

Las estructuras constituyen un elemento fundamental para conseguir la necesaria seguridad de las construcciones que en ellas se sustentan, tanto de edificación como de ingeniería civil y, en consecuencia, la de los usuarios que las utilizan. Entre los diferentes materiales que se emplean en su construcción, el hormigón es el más habitual, por lo que su control y Mantenimiento cobran una especial relevancia para la consecución de dicha seguridad. Es fundamental estudiar aquellos síntomas patológicos que son expresivos de un comportamiento anormal de las estructuras de hormigón armado, analizando posteriormente las causas de los mismos, su significado y las actuaciones recomendables.

El hormigón es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante que, generalmente, es un cemento artificial. El más importante y habitual es el cemento Portland. Los áridos proceden de la desintegración o trituración, natural o artificial de rocas. El árido cuyo tamaño sea superior a 4 mm se denomina árido grueso o grava, mientras que el inferior a 4 mm se denomina árido fino o arena. La pasta formada por cemento y agua es la que confiere al hormigón su fraguado y endurecimiento, mientras que el árido es un material inerte sin participación directa en el fraguado y endurecimiento del hormigón. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose diversas reacciones químicas de hidratación que lo convierten en una pasta maleable con buenas propiedades adherentes, que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de consistencia pétreo.

Entre los síntomas patológicos que sufre el hormigón, los más importantes son: las rugosidades y formación de vacíos, los cambios de coloración, las exfoliaciones, las degradaciones y, sobre todo, la aparición de fisuras. La inspección del material para la determinación de la existencia de los distintos tipos de anomalías que pueden presentarse en los elementos de hormigón armado, es imprescindible para poder diagnosticar acertadamente la etiología de las lesiones. La tipología de patologías que generan las anteriores causas,

pueden poner en entredicho la duración de la vida en servicio de las estructuras y, por consiguiente, de las personas que las habitan.

2.2. Reconstrucción de imágenes generadas con Tomografía Computarizada en Rayos-X:

La Tomografía Computarizada (TC) es una técnica que genera imágenes de secciones transversales de una pieza. Esta técnica difiere de la radiografía en que el haz de energía y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se va a obtener la imagen.

Esta técnica genera las imágenes a partir de la señal de atenuación del haz obtenida para diferentes ángulos de proyección de la sección considerada. La atenuación que sufre el haz está directamente relacionada con la densidad, el espesor atravesado y la composición del material así como la energía del haz de Rayos X. La TC utiliza esta información obtenida desde diferentes ángulos para determinar la configuración de la sección transversal con ayuda de un algoritmo de reconstrucción. De esta manera se determina cuantitativamente la distribución punto a punto de los coeficientes de atenuación. La imagen de la sección se puede visualizar asignando un nivel en una escala de grises a cada valor de atenuación.

Los sistemas de Rayos-X empleados en el análisis de mezclas de hormigón son similares a los utilizados en el ámbito médico.

Sin embargo, a diferencia de estos, en el área de la ingeniería la intensidad de los Rayos-X y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución.

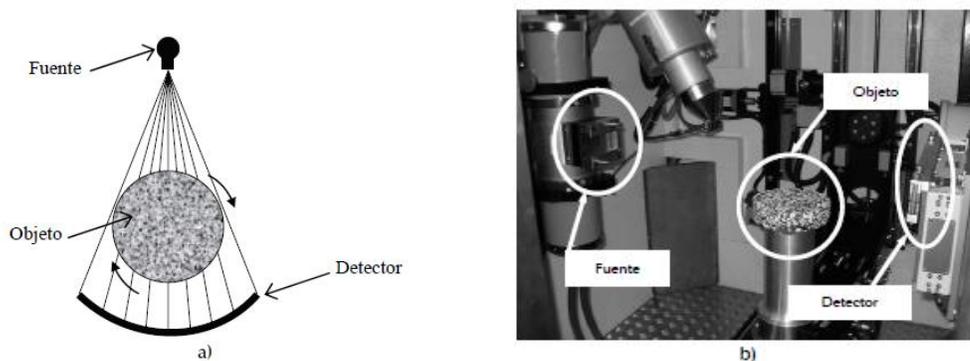
Existen diferentes equipos de Rayos-X de uso industrial cuya clasificación depende del tamaño del objeto a observar y de su resolución: 1) convencional, 2) alta resolución, 3) ultra alta resolución, y 4) micro tomografía.

Los equipos comúnmente utilizados en el análisis de mezclas de hormigón son los de alta resolución y ultra alta resolución, capaces de estudiar objetos con una resolución máxima de 100 μ m y 10 μ m, respectivamente.

Los elementos básicos que conforman un equipo de Rayos-X son una fuente y un detector. La geometría de los Rayos-X y del detector varía dependiendo del equipo. Para el estudio de mezclas de hormigón típicamente se emplean rayos colimados que cubren en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea (Figura 2a). El objeto a escanear se ubica entre la fuente y el detector (figura 2b) y se envía una descarga de Rayos-X desde la fuente hacia el objeto, midiendo la intensidad de la radiación que llega al detector.

La densidad del objeto determina la intensidad de los Rayos-X que llegan al detector. Entre mayor es la densidad del objeto menor es la intensidad de radiación detectada, puesto que los rayos-X son absorbidos por el objeto o reflejados hacia la fuente.

Figura 2. Sistema de Rayos-X: (a) vista en planta de los principales componentes, (b) equipo típico de Rayos-X.



Fuente: REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 28 No. 2

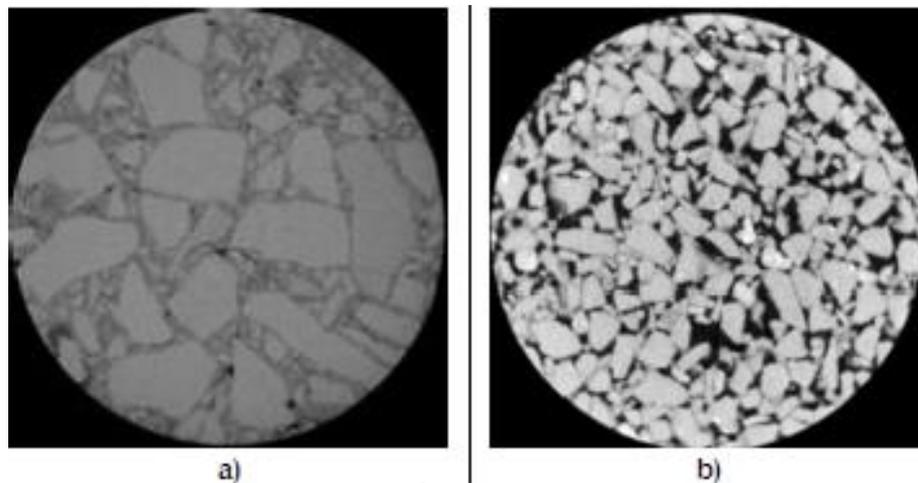
Cada una de las mediciones antes descritas se denomina vista. Es común que la fuente y el detector, o serie de detectores, sean fijos, y que el objeto se ubique sobre una mesa giratoria (flechas curvas en diagrama de la Figura 2a). De esta manera, mientras el objeto rota alrededor de su propio eje se adquieren múltiples vistas en todas sus posibles orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior de imágenes bidimensionales. Dichas

imágenes se denominan secciones, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal.

Después de adquirir una sección, la posición del objeto en el sentido vertical se modifica con base en una distancia fija predeterminada y los pasos anteriores se repiten nuevamente.

Al finalizar el proceso, es posible visualizar y reconstruir el volumen completo utilizando el conjunto de secciones del espécimen obtenidas a diferentes alturas. Dependiendo del tamaño del objeto y la precisión deseada, las distancias verticales típicas para tomar secciones varían entre 0,5 mm y 1 mm (Masad et al., 2007). La Figura 3 presenta ejemplos de secciones adquiridas en mezclas de hormigón. Estas imágenes permiten identificar los diferentes elementos que conforman la mezcla (agregados, pasta de cemento y vacíos) y su distribución real, así como las diferencias que existen en términos de tamaño y proporción de agregados y vacíos en dos tipos diferentes de mezclas de hormigón.

Figura 3. Ejemplos de secciones de mezclas de hormigón: (a) degradación densa, (b) de gradación abierta.



Fuente: REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 28 No. 2

El proceso de reconstrucción da lugar a una matriz bidimensional de números que corresponden a la sección transversal del objeto. Cada número es un punto (píxel) de la imagen.

Para permitir la interpretación de la información contenida en la matriz de datos, esta información es representada como una imagen.

Las imágenes de Tomografía Computarizada son mucho más fáciles de interpretar que las imágenes radiográficas convencionales porque los detalles de la imagen no se superponen. Se puede identificar la posición concreta de cada detalle.

La capacidad de la tomografía computarizada para mostrar varios tipos de defectos tales como:

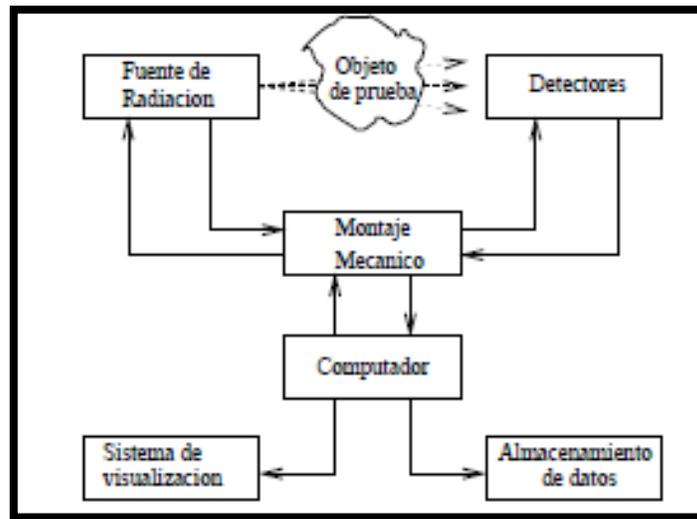
- Huecos e inclusiones: Son defectos fácilmente detectables y de alto contraste.
- Porosidad: Reducen la densidad del material y son visibles si están distribuidos sobre un área con muchos píxeles.
- Grietas abiertas o desplazadas.
- Contacto agregado-agregado.
- Adherencia pasta-agregado.

Instrumentación en Tomografía Computarizada (TC):

Los sistemas de TC modernos, ambos, médicos e industriales, están compuestos por una serie de subsistemas típicos, que se esquematizan en la figura 4. La selección de los componentes de esos subsistemas depende de la aplicación específica para la cual se haya diseñado el sistema; sin embargo la función que desempeña cada subsistema es común en casi todos los escáneres de TC. Esos subsistemas son:

- Una interfaz de operador.
- Una fuente de radiación.
- Un detector de radiación o un conjunto de detectores.
- Un ensamble mecánico de escaneo.
- Un sistema computacional.
- Un sistema de visualización gráfica.
- Un medio de almacenamiento de datos.

Figura 4. Componentes típicos de un sistema de Tomografía Computarizada



Fuente: Tesis; Determinación de la distribución espacial de poros en la pasta de cemento a partir de imágenes obtenidas por tomografía computarizada

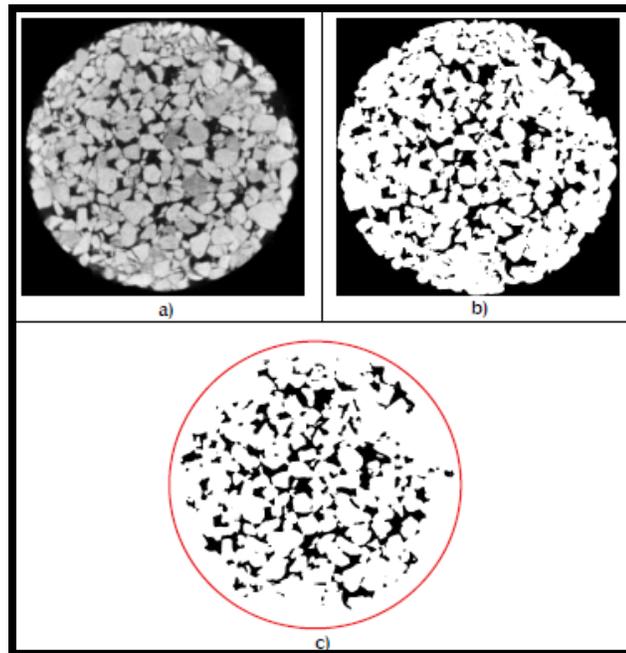
2.3. Caracterización de la estructura de vacíos y del flujo de agua en mezclas de hormigón mediante el análisis de imágenes de Rayos-X

La estructura de vacíos de las mezclas determina en gran medida el desempeño del material en la obra. El parámetro que comúnmente se ha empleado para caracterizar los- vacíos de las mezclas de es el contenido total de vacíos, el cual constituye uno de los principales parámetros de control dentro de los procesos de diseño y construcción de estas mezclas. Sin embargo, el contenido total de vacíos no permite cuantificar el tamaño, distribución o conectividad de los vacíos individuales que existen en el interior de la mezcla. Dicha cuantificación ha cobrado importancia en la medida en que investigaciones recientes, desarrolladas aplicando técnicas de Rayos-X, han demostrado que mezclas de hormigón compuestas por los mismos materiales, en las mismas proporciones y con el mismo contenido total de vacíos, presentan diferentes desempeños y susceptibilidades al daño por humedad (Masad *et al.*, 2006; Arámbula *et al.*, 2007b; Masad *et al.*, 2007). En estos estudios, las imágenes obtenidas a través de técnicas de rayos-X se procesan para:

- Realizar análisis probabilísticos del tamaño de vacíos en la muestra.

- Determinar las posibles rutas disponibles para el transporte de agua al interior de la mezcla (conectividad).
- Con base en los resultados de conectividad, analizar los mecanismos de transporte de agua en la mezcla (permeabilidad y capilaridad).
- Cuantificar la tortuosidad de las potenciales rutas de transporte de agua (la razón entre la longitud real de una ruta de vacíos conectados y la longitud de una línea recta entre sus dos extremos).

Figura 5. Sección de una mezcla de gradación abierta: (a) imagen en escala de grises, (b) imagen binaria de contenido total de vacíos, (c) imagen binaria de vacíos efectivos (tomado de: Álvarez et al., 2007)



Fuente: REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 28 No. 2

La identificación de los vacíos al interior de la mezcla se basa en la escala de grises de las secciones obtenidas durante el escaneo con Rayos-X (Figura 5a). Como se mencionó previamente, el color de cada partícula en la imagen está directamente relacionado con la densidad del material que representa, siendo los objetos más oscuros los de menor densidad (vacíos) y los más claros los de mayor densidad (agregados). De esta manera, a la graduación

de grises se le asigna una escala numérica, que por lo general va desde cero (representando el color negro) hasta 255 (representando el color blanco). Para obtener la cantidad, tamaño y posición de los vacíos se utilizan algoritmos computacionales de procesamiento de imágenes que, con base en un valor límite dentro de la escala numérica de grises, transforman la imagen (*sección*) en una composición binaria (blanco y negro) con el fin de diferenciar el material sólido de los vacíos, tal como se muestra en la Figura 5b.

2.4. Ventajas de la Tomografía Computarizada en Rayos-X, como método para analizar las características internas del hormigón

- La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas o químicas.
- La Tomografía Computarizada es una técnica que permite el análisis no destructivo de piezas de hormigón en todo su volumen.
- La aplicación de esta técnica es de gran interés para diferentes tipos de estudios no solo en el campo de aplicación industrial sino también en investigación y permite obtener información más detallada, de forma menos costosa o a veces imposible de obtener por otros medios.
- Se puede utilizar un conjunto de imágenes de TC para caracterizar el volumen de la pieza, geometría, porosidad, fases materiales, grietas.

2.5. Introducción a otras técnicas no destructivas para la inspección y diagnóstico del estado del hormigón

El termino ensayo no destructivo (END, en ingles non-destructive testing NDT), es una denominación general aplicada a una serie de técnicas destinadas a inspeccionar o probar un material sin perjudicar su estado de servicio futuro, es decir, sin menoscabo de sus propiedades físicas y químicas.

Diversos autores han clasificado los ensayos no destructivos aplicables al hormigón. **Tobio** (1967) propone una clasificación según el tipo de fuente que genera la energía necesaria para su realización. **Fernández Gómez** (2001) los clasifica según su campo de aplicación.

A menudo es necesario para inspeccionar estructuras de hormigón, una vez este ha endurecido, determinar si la estructura es adecuada para su uso proyectado. Lo ideal sería que tales pruebas pudieran hacerse sin dañar el hormigón.

Las técnicas que existen para la evaluación de un elemento de hormigón, engloban las que son completamente no destructivas, que no dañan de ningún modo el elemento estudiado, aquellas técnicas a través de las cuales resulta solo ligeramente dañada la superficie del elemento de hormigón, que se consideran técnicas cuasi no destructivas y, finalmente, las técnicas destructivas, donde la superficie del elemento debe ser reparada tras la prueba.

La gama de propiedades que pueden ser evaluadas utilizando pruebas no destructivas y pruebas destructivas es bastante amplia, e incluye parámetros fundamentales como la densidad, módulo elástico y resistencia, así como la dureza y la absorción de la superficie, la ubicación del armado, su tamaño y distancia a la superficie. En algunos casos también es posible comprobar la calidad de la puesta en obra y la integridad estructural por la capacidad de detectar huecos, grietas y fisuras.

Los ensayos no destructivos se pueden aplicar a las estructuras antiguas y nuevas. Para las nuevas, las aplicaciones más probables estarán relacionadas con el control de calidad, o para resolver dudas sobre la calidad de los materiales de construcción. La prueba de las estructuras existentes normalmente está relacionada con la evaluación de la integridad estructural o su adecuación

Existen diversas técnicas no destructivas para la inspección de hormigón. A continuación se enumeran las principales:

2.5.1. Inspección visual:

Es el precursor esencial para cualquier ensayo no destructivo previsto. Sirve para poder establecer las posibles causas de los daños aparecidos en una estructura de hormigón armado y, por tanto, identificar cuáles de los diversos métodos de ensayos no destructivos disponibles, podrían ser de utilidad para la investigación de la patología.

2.5.2. Método de potencial eléctrico de media celda:

Se utiliza para determinar el potencial de corrosión de las barras de acero del armado de las estructuras.

2.5.3. Métodos basados en ondas elásticas:

Consisten en introducir un pulso elástico en el medio a estudio mediante un transductor (pulso-eco) o impacto mecánico (impacto-eco). El pulso-eco se propaga por el medio y se refleja en aquellos defectos del material o interfaces de diferentes densidades o módulos elásticos. Estas ondas reflejadas, se reciben en un segundo transductor, cuya salida es un osciloscopio o equipo similar. Se utiliza en la detección de discontinuidades o interfaces del elemento de hormigón a estudio, así como coqueas y calidad del hormigón.

Dentro de estas técnicas, la más empleada para la inspección de hormigón es la técnica de ultrasonidos.

La generación de las ondas ultrasónicas se basa en que una unidad de pulso envía una señal eléctrica al transductor, el cual, mediante un cristal piezoeléctrico interno, genera una onda de tensión de baja energía y alta frecuencia. La onda viaja entonces a través de la sección, siendo captada por el transductor receptor, que puede situarse en varias posiciones en función del método empleado, el cual a su vez convierte la energía de la onda en energía eléctrica.

El procedimiento de interpretación de esta técnica se realiza analizando las variaciones que experimentan el pulso u onda durante su tránsito por el medio objeto de estudio. Mediante la inspección ultrasónica se obtiene fundamentalmente información de los diferentes caminos de propagación que recorre la onda a través del material. Se determina el tiempo de recorrido y la potencia del impulso recibido respecto del emitido.

El hormigón se caracteriza por su carácter heterogéneo. Ello provoca comportamientos diversos ante la propagación de las ondas elásticas y es en este principio en el que se fundamenta la técnica de ultrasonidos.

2.5.4. Georradar:

A grandes rasgos, es un método de investigación no destructivo del interior de medios materiales. Se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos de muy corta duración a través de una antena y que se transmiten por el medio que se quiere analizar. Permite obtener imágenes del interior de un medio relacionadas con cambios en sus parámetros electromagnéticos. De este modo, se utiliza para localizar oquedades, nivel freático, elementos embebidos en el interior del medio, etc...

2.5.5. Termografía infrarroja:

Cualquier objeto cuya temperatura sea superior al cero absoluto ($0 \text{ Kelvin} = -273.15 \text{ }^\circ\text{C}$) emite radiación infrarroja, invisible al ojo humano. Tal y como demostró el físico **Max Planck** en el año 1900, existe una correlación entre la temperatura de un cuerpo y la intensidad de la radiación infrarroja que emite. Una cámara termografía mide la onda larga de la radiación infrarroja recibida en el campo de visión, a partir de la cual calcula la temperatura del objeto a medir. El cálculo tiene en cuenta la emisividad de la superficie del objeto medido, así como la compensación de la temperatura reflejada. La termografía (medición de temperatura con una cámara termografía) es un método de medición pasivo, sin contacto. La imagen termografía muestra la distribución de temperatura en la superficie de un objeto, por lo que una cámara termografía no se debe usar para inspeccionar el interior o

a través de los objetos. Se utiliza para detectar huecos, fisuras, presencia de humedad y otras patologías en el hormigón.

Tabla 1. Esquema de los principales métodos no destructivos empleados.

| MÉTODO | DESCRIPCIÓN | RESULTADOS | VENTAJAS/ DESVENTAJAS |
|-------------------------------|---|--|--|
| Georadar | Se trata de pulsos electromagnéticos transmitidos al material y después registrados por una antena receptora. | <ul style="list-style-type: none"> • Detección de huecos • Geometrías ocultas • Distribución de humedades | Alta capacidad de penetración y buenos resultados de la estructura interna. Relativamente rápida pero necesita de personal especializado para su interpretación. |
| Termografía infrarroja | Recoge la radiación térmica de la superficie analizada con una cámara de infrarrojos. | <ul style="list-style-type: none"> • Identificación a distancia de materiales • Detección de zonas húmedas | Un método de detección remota que no tiene ningún contacto con la superficie analizada. Penetra muy pocos centímetros en el material y se necesita de personal formado para su interpretación. |
| Auscultación sónica | Ondas sonoras que se transmiten a través de una estructura a una velocidad proporcional a las propiedades del material. | <ul style="list-style-type: none"> • Detección de huecos y grietas • Geometría oculta • Integridad estructural | Tiene una alta capacidad de penetración y ofrece información muy valiosa de la estructura interna analizada. Requiere personal especializado para una buena interpretación. |
| Boroscopía | Una pequeña cámara insertada en zonas muy estrechas. | <ul style="list-style-type: none"> • Identificación de materiales • Detección de huecos y defectos • Calibración de otros ensayos | Provee información muy localizada. |

Fuente: Técnicas no destructivas aplicadas al Patrimonio Construido

2.6. Materiales para la mezcla de hormigón

Los materiales usados para la elaboración del concreto convencional son: cemento, agua, agregado grueso y fino, y algunas veces aditivos químicos. Los materiales utilizados deben de cumplir con los requerimientos mínimos aplicables que proporcione una mezcla adecuada, económica y funcional.

Figura 6. Componentes de Hormigón



Fuente: Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto

2.6.1. Cemento:

Es un conglomerante que une o da cohesión, producido por la pulverización de la escoria que consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, que en forma usual contienen una o más formas de sulfatos de calcio que se añade y se muele con ella.

El cemento no es compuesto químico simple, sino una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos forman el 90 % o más del peso del cemento y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminaferrito tetracálcico.

Para la elaboración de los distintos tipos de hormigones se debe hacer uso solo de cementos que cumplan las exigencias de las normas bolivianas referentes al Cemento Portland (NB 2.1-001 hasta NB 2.1-014).

En ningún caso se deben utilizar cementos desconocidos o que no lleven el sello de calidad otorgado por el organismo competente.

En los documentos de origen figurarán el tipo, la clase y categoría a que pertenece el cemento, así como la garantía del fabricante de que el cemento cumple las condiciones exigidas por las NB 2.1-001 hasta 2.1-014.

Se recomienda que si la manipulación del cemento se va a realizar por medios mecánicos, su temperatura no exceda de setenta grados centígrados: y si se va a realizar a mano, no exceda del mayor de los dos (2) límites siguientes:

- Cuarenta grados centígrados (40 °C).
- Temperatura ambiente más cinco (5) grados centígrados (5 °C).

Cuando la temperatura del cemento exceda de 70 °C, deberá comprobarse con anterioridad a su empleo, que éste no presenta tendencia a experimentar falso fraguado: de otro modo su empleo no está permitido, hasta que se produzca el enfriamiento.

Cuando el suministro se realice en sacos, el cemento se recibirá en obra en los mismos envases cerrados en que fue expedido de fábrica y se almacenará en sitio ventilado y protegido, tanto de la intemperie como de la humedad del suelo y de las paredes. Si el suministro se realiza a granel, el almacenamiento se llevará a cabo en silos o recipientes que lo aíslen de la humedad.

Si el periodo de almacenamiento ha sido superior a un mes, se comprobará que las características del cemento continúan siendo adecuadas. Para ello, se realizarán los oportunos y previos ensayos de fraguado y resistencias mecánicas a tres y siete días, sobre una muestra representativa del cemento almacenado, sin excluir los terrones que hayan podido formarse.

2.6.2. Agregados

Los agregados se definen como el material granular que abarca aproximadamente el 75 % al 85 % por ciento del volumen de una mezcla de hormigón, y cuya finalidad es conformar el esqueleto del concreto y por lo tanto afectan de manera significativa las propiedades de éste en estado fresco como en estado endurecido

duras, limpias, durables, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimiento de arcilla y otros materiales finos que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta del cemento. La selección adecuada de los agregados dará lugar a diseños económicos y durables. (Baños Merlin, 2012)

La calidad del agregado y la granulometría son factores que influyen en el producto final del hormigón. Entre los diseñadores de mezclas de hormigón, han surgido ligeras diferencias en la selección del tamaño máximo del agregado (TMA), la proporción de arena en la mezcla y el porcentaje de finos que pasa la malla N° 200 (0.75 mm).

Clasificación de los agregados

Es necesario realizar esta división de los materiales debido a la condición mínima del concreto de dividir a los agregados en dos grupos, cuya frontera nominal es la malla N° 4 (4.75 mm), obteniendo por resultado lo mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los agregados según los límites granulométricos

| Clasificación | Intervalo nominal (mm) | Mallas ASTM correspondientes |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------|
| Agregado Fino | 0.075 - 4.75 | N° 200 a N° 4 |
| Agregado Grueso | 4.75 - variable | N° 4 |

Fuente: Norma ASTM C 33

- Agregado Grueso.- Por lo general consiste de grava triturada o sin triturar, piedra triturada, o una combinación de los mismos. Algunos depósitos naturales de agregado, a veces llamados gravas de mina, río, lago o lecho marino. El agregado ideal debe ser limpio, cúbico, anguloso, triturado, con un mínimo de partículas planas y alargadas.

- Agregado Fino.- Puede consistir en arena natural, arena manufacturada, o una combinación de los dos.

La arena manufacturada deberá provenir de rocas sanas y durables, que cumplan los requisitos de calidad necesarios para obtener un hormigón de las características exigidas.

- Finos.- En mezclas de bajo contenido de materiales cementantes, finos sustituyentes, y material que pasa la malla N° 200, son usualmente requeridos para rellenar los vacíos de los agregados.

Calidad

La calidad requerida de los agregados depende de las propiedades deseadas del hormigón, principalmente de su resistencia. Para un hormigón de alta resistencia, es necesario un agregado de alta calidad. Los ensayos estándar para determinar la calidad y características de los agregados son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Características y ensayos para agregados

| Características | Importancia | Denominación de ensayo (U.S.) | Nombre del ensayo |
|---------------------------------|---|--|--|
| Granulometría | Consistencia, economía en la compactación | ASTM C 136 ASTM C 117 | Análisis por tamizado de agregado grueso y fino. Materiales más finos que la malla N° 200 en agregados minerales por lavado. |
| Resistencia a la abrasión | Calidad del agregado, resistencia de la cobertura de superficie | ASTM C 131 ASTM C 535 ASTM C 295 | Resistencia a la degradación de agregado grueso pequeño por abrasión e impacto en la Máquina de los Ángeles. Resistencia a la degradación de agregado grueso grande por abrasión e impacto en la Máquina de los Ángeles. Examinación petrográfica de agregado para concreto. |
| Gravedad específica - absorción | Cálculo del diseño de mezclas | ASTM C 127 ASTM C 128 | Gravedad específica y absorción del agregado grueso. Gravedad específica y absorción del agregado fino. |
| Peso unitario Bulk o densidad | Cálculo del diseño de mezclas | ASTM C 29 | Peso unitario y vacíos en el agregado. |
| Resistencia a los sulfatos | Inalterabilidad en contra del desgaste y ataque químico | ASTM C 88 | Inalterabilidad del agregado por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio. |
| Impurezas orgánicas | Ganar resistencia | ASTM C 40 | Impurezas orgánicas en el agregado fino para concreto. |

Fuente: Escalaya Miriam, 2006

Granulometría

Granulometría (Arena): La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas de arena. La distribución del tamaño de partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. Las mallas normalizadas usadas por el agregado fino son las siguientes:

Tabla 4. Granulometría del agregado fino

| Tamiz (Esp. ASTM E11) | Porcentaje que Pasa | |
|--------------------------|---------------------|------------------------|
| | Arena Natural | Arena manufacturada |
| 9.5 mm (3/8") | 100 | 100 |
| 4.75 mm (N°4) | 95 a 100 | 95 a 100 |
| 2.36 mm (N°8) | 80 a 100 | 80 a 95 |
| 1.18 mm (N°16) | 50 a 85 | 45 a 95 |
| 600 µm N°30) | 25 a 60 | 25 a 75 |
| 300 µm (N°50)..... | 5 a 30..... | 10 a 35 |
| 150 µm (N°100)..... | 0 a 10..... | 8 a 20 |

FUENTE: Norma ASTM C33

Granulometría (Grava): Agregado grueso debe estar graduado dentro de los límites establecidos en la norma ITINTEC 400.037 o en la norma ASTM C33, donde la distribución del tamaño de partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. Las mallas normalizadas considerando el tamaño máximo del agregado según el requerimiento de dosificación, el límite que separa el agregado fino de los agregados gruesos queda retenido en el tamiz N°4 – 4.75 mm y puede llegar a tener un diámetro hasta 4” – 100 mm.

Tabla 5. Requisitos de granulometría para agregado grueso

| TAMAÑO N° | TAMAÑO NOMINAL EN PULGADAS | PORCENTAJES PASANTES EN PESO PARA CADA MALLA STANDARD | | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------------------|---|---------------|-------------|----------------|-------------|-------------------|------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | 4" (100 mm) | 3 1/2" (90mm) | 3" (75 mm) | 2 1/2" (63 mm) | 2" (50 mm) | 1 1/2" (37.5 mm) | 1" (25mm) | 3/4" (19mm) | 1/2" (12.5 mm) | 3/8" (9.5 mm) | N° 4 (4.75 mm) | N°8 (2.36 mm) | N°16 (1.18 mm) |
| 1 | 3 1/2" a 1 1/2" | 100 | 90 a 100 | ----- | 25 a 60 | ----- | 0 a 15 | ----- | 0 a 5 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 2 | 2 1/2" a 1 1/2" | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | ----- | 0 a 5 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 3 | 2" a 1" | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | ----- | 0 a 5 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 357 | 2" a Malla # 4 | ----- | ----- | ----- | 100 | 95 a 100 | ----- | 35 a 70 | ----- | 10 a 30 | ----- | 0 a 5 | ----- | ----- |
| 4 | 1 1/2" a 3/4" | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 15 | ----- | 0 a 5 | ----- | ----- | ----- |
| 467 | 1 1/2" a Malla # 4 | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 95 a 100 | ----- | 35 a 70 | ----- | 10 a 30 | 0 a 5 | ----- | ----- |
| 5 | 1" a 1/2" | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | ----- | ----- | ----- |
| 56 | 1" a 3/8" | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 40 a 85 | 10 a 40 | 0 a 15 | 0 a 5 | ----- | ----- |
| 57 | 1" a Malla # 4 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 95 a 100 | ----- | 25 a 60 | ----- | 0 a 10 | 0 a 5 | ----- |
| 6 | 3/4" a 3/8" | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 15 | 0 a 5 | ----- | ----- |
| 67 | 3/4" a Malla # 4 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | ----- | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | ----- |
| 7 | 1/2" a Malla # 4 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 100 | 90 a 100 | 40 a 70 | 0 a 15 | 0 a 5 | ----- |
| 8 | 3/8" a Malla # 4 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | 85 a 100 | 0 a 30 | 0 a 10 | 0 a 5 |

Fuente: Norma ASTM C33

2.6.3. Agua

El único requerimiento para el agua en mezclas de hormigón es que ésta debe estar libre de una excesiva cantidad de álcalis, ácidos o material orgánico que pueden inhibir la adecuada ganancia de resistencia. La mayoría de las mezclas de hormigón requieren de 89 a 119 Kg de agua por m³ para agregados de tamaño máximo mayor que 2 pulg (50 mm).

2.7. Propiedades del hormigón

2.7.1. Resistencia del hormigón

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 hormigón contiene algunas grietas finas aun antes de estar sujeto a esfuerzos externos. En el hormigón 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 hormigón 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 hormigón, 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 hormigón 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 hormigón 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 hormigón.

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 hormigón, 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.

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 hormigón 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 hormigón de peso normal.

Efectos de la porosidad en la resistencia a la compresión:

La respuesta del hormigón 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 hormigón. Los factores incluyen las propiedades y las proporciones de los materiales que constituyen la mezcla del hormigón, 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 hormigón: la matriz y la zona de transición es impráctica, y por lo tanto, no se pueden desarrollar modelos precisos para predecir la resistencia del hormigón. 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

Efectos de la porosidad en el modo de falla del hormigón:

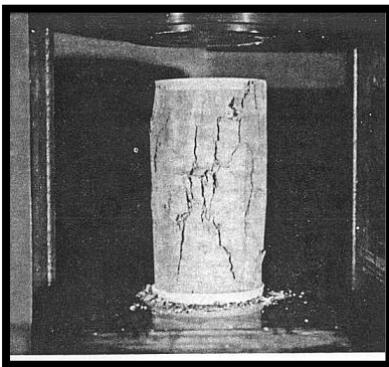
Con un material como el hormigón, que contiene espacios vacíos de varios tamaños y formas en la matriz, y microgrietas en la zona de transición entre la matriz y los agregados gruesos, los modos de falla bajo esfuerzos son muy complejos y varían con el tipo de esfuerzo. Sin embargo, una breve revisión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

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 hormigón 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 hormigón a compresión.



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

2.7.2. Durabilidad del hormigón

Según el comité ACI 201, la durabilidad del hormigón 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 hormigón 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 hormigón se concentraban en alcanzar resistencias más y más altas, pues había una suposición de que el hormigón resistente era hormigón 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 hormigón, 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 hormigón; siendo pequeñas, las fisuras 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 hormigón.

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 hormigón y se sabe que tiene microestructura diferente del volumen de la pasta de cemento endurecido. La interface es también el lugar de micro agrietamiento temprano. Por estas razones, se espera que la zona de interface, contribuya significativamente a la permeabilidad del concreto. Sin embargo, **Larbi** halló que, a pesar de la mayor porosidad en la zona de interface, la permeabilidad del hormigón se controla mediante el volumen de la pasta de cemento endurecido, la cual es la única fase continua del hormigón.

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 hormigón hecho con una pasta de cemento similar.

Sin embargo, también es importante para el hormigón 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, inclu

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 hormigón. Lo mismo se aplica a vacíos de aires discretos, tales como burbujas de aire arrastradas. Además, el hormigón 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 hormigón; la última cifra representa un hormigón altamente segregado de resistencia muy baja.

2.7.3. Permeabilidad al agua del hormigón

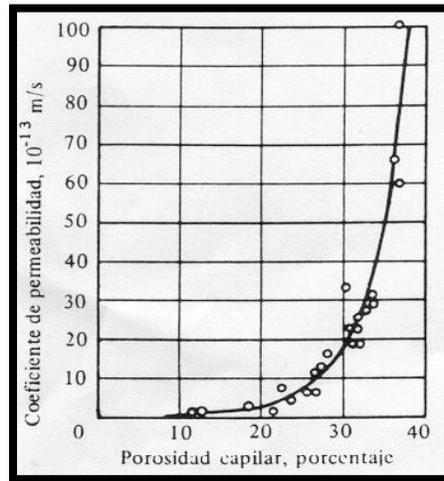
Se puede notar que la pasta de cemento endurecido se compone de partículas conectadas por sólo una fracción pequeña de la superficie total de ellas. Por esta razón, una parte del agua está adentro del campo de fuerza de la fase sólida, es decir, está absorbida. Esta agua tiene una viscosidad alta, pero,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

La permeabilidad del hormigón no es una función sencilla de la porosidad del hormigón, 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 6. Comparación entre permeabilidades de rocas y pastas de cemento

| Tipo de roca | Coefficiente 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.

En el hormigón, 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 hormigón 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 hormigones con una permeabilidad muy baja.

La permeabilidad del hormigón 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.

La diferencia entre la pasta de cemento endurecido y el hormigón 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 hormigón. 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 hormigón compactado plenamente es la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido la que tiene el efecto más grande sobre la permeabilidad del hormigón.

2.1.1. Peso específico

Es lo que comúnmente conocemos como densidad, la que según se define ASTM E12 como la masa de un volumen unitario de material, a una temperatura establecida. Si el material es sólido, el volumen es de la parte impermeable, si en lugar de la masa se hace referencia al peso del volumen unitario, ésta se conoce como densidad aparente. Las unidades según el

sistema internacional de la densidad son gr/cm^3 . En cambio el peso específico carece de unidades ya que es una relación de pesos entre el material al del agua destilada.

2.8. Características internas del hormigón

2.8.1. Contacto agregado-agregado.

El contacto agregado-agregado depende de la traba mecánica aportada por la superficie de los agregados, además de las propiedades químicas y físicas de ellos. El contacto es mayor cuanto más rugosa es la superficie y cuanto más limpios estén.

Una de las características más importante de los agregados para que haya un buen contacto agregado-agregado es su forma.

Forma del agregado

Se ha producido hormigón satisfactorio con agregado que consta de una gran diversidad de formas diferentes. Un agregado grueso con muchos ángulos, que presentara un mayor número de vacíos, exigirá una mayor cantidad de arena para dar lugar a un hormigón trabajable, pero tendrá un mayor contacto agregado-agregado. Inversamente, el agregado grueso bien redondeado que tiende hacia las partículas esféricas requerirá menos arena y tendrá un mayor contacto agregado-agregado. No obstante, resulta interesante hacer notar que los hormigones producidos con una gran disparidad en las formas de las partículas, con un contenido dado de cemento por metro cubico de hormigón, con frecuencia tendrán más o menos la misma resistencia a la compresión.

2.8.2. Adherencia pasta-agregado

La adherencia es la fuerza necesaria para separar dos componentes sólidos unidos entre sí en su interface. Este concepto ha sido ampliamente utilizado para explicar muchas de las propiedades observadas en el hormigón, dado su carácter heterogéneo y suelto en estado fresco y la necesidad de un comportamiento unido y monolítico, en su estado endurecido.

La adherencia pasta-agregado es el resultado de una combinación o entrelazamiento mecánico de los productos de hidratación del cemento con la superficie del agregado, y de reacciones químicas entre ésta superficie y la pasta de cemento.

La adherencia entre los agregados y la pasta de cemento es determinante en la resistencia del hormigón especialmente las de flexo tracción.

Sin lugar a dudas, la unión de la pasta con la superficie de los agregados se origina en el desarrollo de los productos de la hidratación del cemento.

Naturaleza mecánica de la adherencia:

Una vez terminado el proceso de mezclado del hormigón, las partículas de agregado quedan embestidas en la matriz de pasta agua-cemento. Idealmente, la pasta forma una película delgada alrededor de las partículas de agregado, especialmente de los agregados gruesos, aunque también de los finos (la parte más fina de los agregados finos forma parte de la pasta). Después de unos minutos, en los que inicia la reacción del yeso con el aluminato tricálcico para producir sulfo-aluminatos cálcicos hidratados, se inicia la reacción de los silicatos di y tricálcicos, para producir silicatos cálcicos hidratados, o gel C-S-H. Estos productos, que en su mayoría se parecen físicamente a agujas largas y finas, se entrelazan entre sí y con la superficie de los agregados, generando un entramado mecánico que se hace más denso conforme se hidrata más el cemento, y que, cuando endurece, genera la adherencia pasta-agregado.

Naturaleza química de la adherencia:

Además, diversas investigaciones han proporcionado evidencia indirecta de una reacción química entre el cemento y los agregados. Para agregados silíceos, **Suzuky y Mizukami** (1962) mencionan que “la reacción química entre pasta de cemento y agregado, explicaría los diferentes grados de adherencia obtenidos en rocas con la misma cantidad y cristalinidad de productos precipitados de hidratación de cemento”. **Alexander et al**, (1968) mencionan “la existencia de una reacción puzolánica entre cemento y rocas silíceas”. **Schwiire et al** (1968) demostraron que “podría formarse gel C-S-H por reacción química entre cuarzo y una solución de hidróxido de calcio, e indicaron que podría ocurrir una reacción similar en el hormigón”. Aunque el gel C-S-H puede formarse sobre cualquier material silíceo, los autores han señalado que “la velocidad de formación dependería de la estructura exacta del cristal del agregado”. **Scholer** (1967) y **Chatterji y Jeffrey** (1971) indicaron que “un agregado silíceo proporciona parte del material necesario para la formación del gel C-S-H, y, por lo tanto, producen mayor adherencia química”.

2.8.3. Porcentajes de vacíos.

El porcentaje de vacíos se refiere a la cantidad de vacíos en función al volumen total de la muestra de hormigón.

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

Normalmente el hormigón 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 hormigón. El agua y el aire toman espacio dentro del hormigón aún después que el hormigón es derramado en el lugar y durante las primeras etapas del fraguado.

Cuando el hormigón es trabajado en su lugar y empieza a cuajarse o endurecerse, los ingredientes más pesados tienden a asentarse hacia abajo 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 vacíos 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 (vacíos). Frecuentemente los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del hormigón, debilitándolo.

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

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

La estructura de la porosidad en el hormigón 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 hormigón. 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.

Tipos de poros que se encuentran en el hormi

36

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

Hay una variedad de tipos de poros en el hormigón. 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) Micro-vacíos 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 han 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 hormigón en las siguientes clases:

37

- 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 micro-grietas que se desarrollan en esta región de interface 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 hormigón: 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 IUPAC de tamaños de poros, el diámetro de un micro-poro es de 2 nm o menos, mientras el de un meso-poro está entre aproximadamente 2 y 50 nm. Los meso-poros 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 que las mezclas minerales afectan la permeabilidad; la base para este efecto puede ser por lo que se refiere a la formación de una cantidad grande de porosidad en el rango de meso-poros. Sin embargo, esta vista requiere la comprobación experimental más allá para los sistemas de cemento de portland-puzolana y portland-escoria.

2.9. eFilm lite

Es una aplicación utilizada para la visualización y manipulación de imágenes. Las imágenes digitales y datos de diversas fuentes (incluyendo CT, MR, unidades estadounidenses y dispositivos radiográficos digitales, dispositivos de captura secundaria, escáneres, puertas de enlace de imágenes, o de las fuentes de imágenes) se pueden visualizar, analizar, procesar y almacenar a través de redes informáticas utilizando este programa.

La determinación de vacíos se basa en la calibración inicial realizada. Esta calibración permite determinar aquellas zonas que no están dentro del rango de densidades (niveles de gris) que corresponden al material y que por lo tanto pueden considerarse como vacíos. Estas zonas tienen que estar dentro del área delimitada por la pieza de hormigón que es la región de interés considerada.

El programa utilizado en este trabajo dispone herramientas disponibles que permiten seleccionar áreas crecientes a partir de un punto en función del rango de grises considerado y realizando este trabajo para cada uno de los vacíos. Generando una región de interés para cada vacío. A partir de ahí obtener todos los datos necesarios.

Este programa es el más utilizado en el ámbito médico debido a su fácil manejo a la hora del análisis de las imágenes obtenidas por la tomografía computarizada y por lo tanto en el área de la ingeniería también es de gran utilidad por la misma razón. Este programa es muy exacto porque se puede visualizar claramente cada vacío que existe en la imagen y también si los agregados están o no conectados.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DE

LA

INVESTIGACIÓN

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Descripción de la investigación

El presente trabajo consistirá en una comparación de los conocimientos empíricos que se tienen del porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado y adherencia pasta-agregado del hormigón con los valores obtenidos utilizando la Tomografía Computarizada en Rayos-X.

Para las probetas de hormigón diseñadas se realizarán 78 probetas con tres dosificaciones diferentes:

- Dosificación 1 con grava chancada denominada “GC1” con resistencia de diseño de 210 kg/cm².
- Dosificación 1 con canto rodado denominada “CR1” con resistencia de diseño de 210 kg/cm².
- Dosificación 2 con grava chancada “GC2” con resistencia de diseño de 240 kg/cm².
- Dosificación 2 con canto rodado “CR2” con resistencia de diseño de 240 kg/cm².
- Dosificación 3 con grava chancada “GC3” con resistencia de diseño de 270 kg/cm².
- Dosificación 3 con canto rodado “CR3” con resistencia de diseño de 270 kg/cm².

Con el fin de analizar la influencia de la relación agua/cemento en las propiedades del hormigón, de las 54 probetas hechas con cada dosificación se ensayará la resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días, con 3 probetas para cada edad del hormigón y se utilizarán otras 18 para la permeabilidad y las 6 restantes serán para ser estudiadas con la Tomografía Computarizada en Rayos-X con el fin de analizar las imágenes generadas y obtener el porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado y adherencia pasta-agregado del hormigón endurecido.

Una vez realizados los ensayos a las 78 probetas, se procederá a tabular e interpretar los valores obtenidos, y finalmente comparar dichos valores con los valores teóricos ya existentes (valores que se encuentran en las tablas 7 y 8).

Tabla 7. Incidencia de la forma y textura de los agregados en la mezcla de hormigón

| FORMAS Y TEXTURAS DEL AGREGADO GRUESO | DESCRIPCIÓN |
|--|--|
| FORMAS IRREGULARES Y TEXTURAS RUGOSAS | Exigirá una mayor cantidad de arena para dar lugar a un hormigón trabajable, tendrá un mayor contacto agregado-agregado y tendrá una buena adherencia pasta-agregado |
| FORMAS REDONDEADAS Y TEXTURA LISA | Requerirá menos arena y tendrá mayor trabajabilidad, tendrá un menor contacto agregado-agregado y tendrá una menor adherencia pasta-agregado. |

Fuente: Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto

Tabla 8. Porcentaje de vacíos en el hormigón según el tamaño del agregado grueso.

| TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO GRUESO | PORCENTAJE DE VACÍOS |
|--|-----------------------------|
| 3/8" | 3% |
| 1/2" | 2,50% |
| 3/4" | 2% |
| 1" | 1,50% |
| 1 1/2" | 1% |
| 2" | 0,50% |
| 3" | 0,30% |
| 4" | 0,20% |

Tabla confeccionada por el comité 211 de ACI

Los materiales que se utilizaron en las mezclas de hormigón serán: Cemento, agregado grueso, agregado fino y agua. No se utilizó ningún aditivo ni puzolana en la mezcla.

3.2.1. Cemento

El cemento que se utilizó en la presente investigación es el Cemento Portland “El Puente”, debido a que es el más común en nuestro medio.

Categoría 30 MPa (306 Kg/cm²) de resistencia mínima a la compresión según la Norma Boliviana NB-011.

Sus principales propiedades son resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor retracción y endurecimiento algo más lento; por lo tanto cumple con las necesidades del hormigón.

Tabla 9. Informe de control de calidad Cemento El Puente

| Especificaciones Químicas | Porcentaje | Especificaciones Físicas | Cantidad | Unidad | |
|--------------------------------|------------|--------------------------|----------|--------------------|-------|
| PPF | 3,95 | Blaine | 3421 | cm ² /g | |
| SiO ₂ | 22,02 | Tiempo de Fraguado | Inicial | 02:39 | min |
| Al ₂ O ₃ | 4,93 | | Final | 04:41 | horas |
| Fe ₂ O ₃ | 3,22 | Expansión Lee Chatelier | 0 | mm | |
| CaO | 59,39 | Relación a/c | 0,542 | ml/g | |
| MG | 3,76 | Fluidez | 110 | % | |
| SO ₃ | 1,74 | Residuos en Mallas | 200 M | 7,7 | % Ret |
| RI | 22,59 | | 325 M | 31,6 | % Ret |
| Cal Libre | 1,11 | Peso Específico | 3,14 | g/l | |

Fuente: Fábrica de Cemento

3.2.2. Agua

El agua de amasado utilizada fue el agua potable disponible en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la UAJMS. No se le realizó ningún examen de conformidad porque la Norma ASTM C 94/C 94M (Especificaciones estándar para el concreto premezclado) permite el uso de agua potable para consumo humano como agua de mezclado en hormigón.

Tabla 10. Análisis físico del agua potable en la ciudad de Tarija

| Parámetro de análisis | Resultados | Unidades |
|-----------------------|-------------------|--------------|
| Aspecto | Limpia cristalina | |
| Olor | Inoloro | |
| PH | 6,88 | |
| Sólido total | 33 | mg/l |
| Calcio | 1 | mg/l |
| Cloruro | 7,9 | mg/l |
| Magnesio | 2,8 | mg/l |
| Impureza total | 3,8 | mg/l |
| Alcalinidad total | 13,2 | mg/l |
| Indice de Langelier | -1,95 | No corrosiva |

Fuente: COOSALT

3.2.3. Agregado grueso

El agregado grueso utilizado para la elaboración de las probetas de hormigón fue grava chancada y grava de canto rodado, obtenida de la empresa constructora Erika S.R.L., ubicada en la comunidad de Rancho Sur.

Para verificar las propiedades del agregado grueso se realizaron las pruebas de laboratorio pertinentes, garantizando así la calidad del hormigón.

Las pruebas realizadas al agregado grueso se encuentran en la sección ANEXOS del presente documento en el Anexo 1.

El agregado grueso utilizado cumple con las especificaciones requeridas, los resultados a los ensayos obtenidos se muestran en anexo 1:

3.2.4. Agregado Fino

De la misma forma que al agregado grueso, se realizaron ensayos de clasificación a la arena utilizada en las mezclas, verificando así que cumple con las condiciones requeridas para obtener un hormigón de buena calidad.

Los ensayos realizados se encuentran en la sección Anexo 1., adjunto al final del presente trabajo, los resultados obtenidos de dichos ensayos se muestran también en anexo 1.

3.3. Diseño de las mezclas

Una vez escogidos los materiales a utilizar en las mezclas de hormigón se procedió a realizar las dosificaciones de las mismas, siguiendo los métodos anteriormente descritos.

En el presente estudio se realizaron tres dosificaciones diferentes para cada filosofía del hormigón variando en ellas el tipo de agregado grueso unas se hicieron con grava chancada y otras con canto rodado, también se varió la resistencia de diseño, el procedimiento para la obtención de las proporciones de cada material se detalla en la sección Anexo 2., la cual se adjunta al final del presente trabajo.

3.3.1. Dosificación de probetas

Los resultados obtenidos para las diferentes dosificaciones se encuentran en la sección ANEXOS del presente documento en el Anexo 2.

3.4. Elaboración de muestras

Después de haber obtenido ya las cantidades de los materiales, se procedió a realizar la elaboración de las mezclas. El procedimiento de elaboración de los especímenes cilíndricos se basó en la norma ASTM C-192.

El procedimiento de elaboración de la mezcla se ejecutó en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la UAJMS, bajo una observación rigurosa.

Para garantizar una buena adherencia de los agregados utilizados (grava y arena) al momento de realizar el hormigón, éstos debieron encontrarse limpios, es decir libres de material orgánico, por lo que fueron lavados con anterioridad a la elaboración de las mezclas.

Los materiales y equipos empleados para la preparación del hormigón, fueron: una hormigonera eléctrica, un cono de Abrams y base, una varilla compactadora, regla enrrasadora, brochas, jarras, recipiente, cucharas, badilejos, guantes, y material de limpieza.

El proceso de mezclado fue el siguiente:

- Para el mezclado de los materiales en la hormigonera, primeramente se introdujo en el tambor una pequeña porción del agua de mezcla, aproximadamente un 10%, añadiendo luego los materiales sólidos, grava, cemento, arena, en este orden, conjuntamente con el 80% del agua. El 10% de agua restante, se termina de introducir cuando todos los materiales se encuentran en la mezcladora. El tiempo de mezclado depende en gran parte de la eficiencia de la mezcladora, pero se consideró satisfactorio, un tiempo de 2 minutos, a partir del instante en que todos los materiales han sido colocados en la hormigonera.
- Una porción de la mezcla fue vaciada en un recipiente para realizar el ensayo de asentamiento en el cono de Abrams, el que fue llenado en tres capas, apisonándolas con la varilla con 25 golpes cada una, una vez lleno el cono se enrasó la mezcla, por último se retiró el cono y midió el asentamiento.
- Una vez realizado el control de la mezcla se prosiguió con el llenado de los moldes.

De las operaciones necesarias para la ejecución de elementos de hormigón, posiblemente sea, el curado de las probetas, la más importante, por la influencia decisiva que tiene en la resistencia y demás cualidades del elemento final.

Aproximadamente 24 horas después del vaciado del hormigón en las probetas, se procedió a desmoldar las mismas y sumergirlas en su totalidad en agua, teniendo el cuidado de no golpear los especímenes, ya que los mismos se encontraban, aún, en estado frágil y se podría afectar su resistencia futura.

El proceso de curado de probetas consistió en la sumersión de las mismas, en las piscinas con agua que se encuentran en el laboratorio, hasta que cumplan la edad requerida para cada ensayo.

3.6. Pruebas aplicadas

3.6.1. Ensayo mecánico de resistencia a compresión del hormigón

El ensayo mecánico de resistencia de las probetas cilíndricas, se efectuó según la norma ASTM C 39; donde se obtiene el esfuerzo a la compresión y la máxima carga del espécimen.

El equipo empleado en este ensayo fue: una prensa hidráulica, balanza eléctrica y un flexómetro.

El procedimiento del ensayo se describe a continuación:

- Primeramente se verificó con el flexómetro las dimensiones de las probetas realizadas para el ensayo.
- Todas las muestras fueron pesadas antes de su respectivo ensayo, se colocaron las probetas en la parte inferior de la prensa, limpiando ésta con anterioridad, se alineó la muestra, con el centro superior de la prensa (soporte con cabeza movable).

- Se cubrió la prensa con una cortina de hule transparente por seguridad, y se puso en funcionamiento la prensa, que aplicó la carga continuamente hasta que la probeta falló, registrando la carga y el esfuerzo máximos que resistió la muestra.
- Se registraron los datos proporcionados por la prensa, se retiró la probeta, y antes de desecharla, se observó detalladamente el tipo de falla que presentó.

3.6.2. Ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido

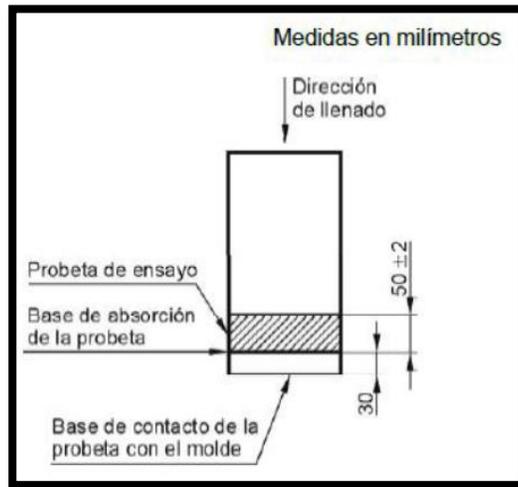
La capacidad y velocidad de succión capilar del hormigón, son parámetros asociados directamente con la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que se produce como consecuencia de la acción de fuerzas de adhesión de las moléculas de agua a las paredes de los poros en el hormigón y otros materiales.

El presente ensayo nos permitió obtener los valores de absorción, porosidad efectiva con los cuales se pudo estimar la permeabilidad de las probetas ensayadas.

El equipo utilizado en el ensayo fue: Un horno de temperatura constante (110°C), una balanza eléctrica, un flexómetro, una brocha y pintura aislante.

Primeramente se prepararon las muestras, para lo cual se cortó las probetas como se indica en la figura:

Figura 9. Preparación de probetas para el ensayo de succión capilar



Fuente: Cristian Sakurai, 2009

Una vez cortadas las probetas, se procedió a sellar, con pintura impermeable, toda la superficie lateral de la muestra, con el fin de evitar la absorción en ese sector no contemplado en los cálculos.

Después se dejó secar las probetas en el horno hasta que el peso de las mismas sea constante.

Se puso agua en una bandeja hasta una altura aproximada de 3 mm, se colocaron las probetas en el agua y se registró el tiempo inicial del ensayo.

Finalmente se registraron los pesos de las probetas en varios intervalos de tiempo, hasta que el peso de las mismas fue constante.

3.6.3. Ensayo para obtener las imágenes de las probetas con la Tomografía Computarizada en Rayos-X

La tomografía se realizó en la clínica Santísima Trinidad, el ensayo consistió en el estudio tomográfico de 6 probetas de las cuales se obtuvo 60 imágenes en total. Las probetas

tienen una altura de 30 cm y el estudio se realizó cada 3 cm con lo cual se obtuvo 10 imágenes por cada probeta.

Luego se procedió a analizar cada imagen para obtener el porcentaje de vacíos, contacto agregado-agregado y adherencia pasta-agregado.

3.7. Teoría estadística para el análisis de datos

3.7.1. Cálculo del error experimental promedio

Existen muchos métodos para determinar el error experimental, pero se aconseja utilizar el cálculo de error de Gauss, que es un método sencillo de aprender, aplicar y que permite extraer el valor medio y el error promedio de una serie de mediciones experimentales dadas, usando las conocidas fórmulas estadísticas.

$$MEDIA = X = \frac{\sum X_i}{n}$$

$$DES\ V\ STD = s = \left(\frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1} \right)^{1/2}$$

$$ERROR\ EXPERIMENTAL = \delta = \frac{\left(\frac{\sum (X_i - X)^2}{n - 1} \right)^{1/2}}{\frac{\sum X_i}{n}}$$

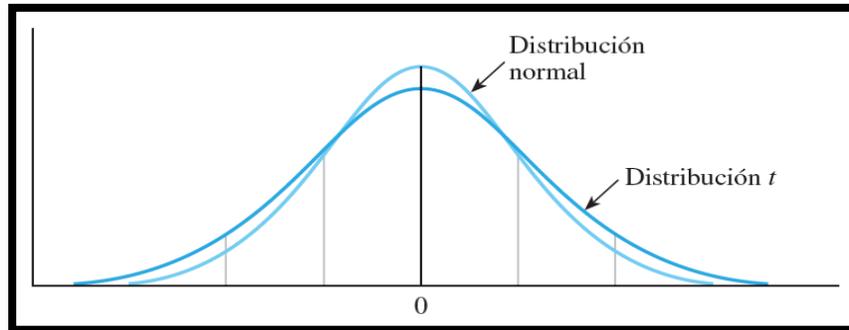
3.7.2. Distribución de probabilidades

Para la determinación de la resistencia característica se utilizó la tabla de “t” de student ya que este medio es aplicable para cualquier número de ensayos.

La gráfica muestra a la Distribución “t” de Student. Es una curva simétrica respecto de 0. Se la compara con la curva normal, note que es ligeramente más achatada que la curva normal.

Sus correspondientes colas que se extienden a izquierda y derecha son ligeramente más altas que en la curva normal.

Figura 10. Distribución Normal, Distribución "t" de Student



Fuente: Mendenhall, 2006

La Distribución “t” de Student con r grados de libertad es adecuada cuando el número de elementos de una muestra es pequeño (En la práctica menor a 30).

La distribución “t” de Student se aproxima a una Distribución Normal $N(0,1)$, cuando r tiende a ∞ , En la práctica se considera buena la aproximación para $N < 30$.

En la práctica la Distribución “t” de Student se emplea en la teoría de las pequeñas muestras y particularmente cuando se estudia la confiabilidad.

Grados de libertad: se entiende por grados de libertad a las opciones que se presentan en la estimación del cálculo.

3.7.3. Definición de Resistencia Media y Resistencia Característica

- **Resistencia Media**

Dado un conjunto de n probetas cilíndricas, hechas con hormigón de una cierta calidad, las cuales son ensayadas a compresión, se obtendrá un conjunto de n valores de la tensión de rotura del material generalmente distintos entre sí, se define como resistencia media:

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci}$$

Dónde:

f_{cm} : Resistencia media

n : Número de probetas ensayadas

f_{ci} : Tensión de rotura para cada probeta

- **Desviación estándar**

$$s = \sqrt{\frac{\sum (f_{cm} - f_{ci})^2}{n - 1}}$$

Dónde:

f_{ci} : Valores de cada observación

f_{cm} : Media de la muestra

n : Número de elementos de la muestra

- **Resistencia característica**

La resistencia media es un valor que representa mejor la calidad de hormigón que cualquiera de los resultados aislados de cada probeta, sin embargo no da una idea precisa de la homogeneidad de la calidad del hormigón. Con el propósito de tener en cuenta este problema se introdujo el concepto de resistencia característica del hormigón. Que se define:

$$f_{ck} = f_{cm} - K \times s$$

Dónde:

f_{ck} : Resistencia característica del hormigón

s : Desviación estándar

El valor de K para encontrar la resistencia característica del hormigón es un valor tal que es igualado o superado, como mínimo por 95% de las probetas ensayadas. En la tabla 11 se indican los valores de K:

Tabla 11. Distribución "t" de Student (Grado de confiabilidad 95%)

| Número de ensayos menos uno | K | Número de ensayos menos uno | K |
|--------------------------------|------|--------------------------------|------|
| 1 | 6.31 | 17 | 1.74 |
| 2 | 2.92 | 18 | 1.73 |
| 3 | 2.35 | 19 | 1.73 |
| 4 | 2.13 | 20 | 1.72 |
| 5 | 2.02 | 21 | 1.72 |
| 6 | 1.94 | 22 | 1.72 |
| 7 | 1.90 | 23 | 1.71 |
| 8 | 1.86 | 24 | 1.71 |
| 9 | 1.85 | 25 | 1.71 |
| 10 | 1.81 | 26 | 1.71 |
| 11 | 1.80 | 27 | 1.7 |
| 12 | 1.78 | 28 | 1.7 |
| 13 | 1.77 | 29 | 1.7 |
| 14 | 1.76 | 30 | 1.7 |
| 15 | 1.75 | Mayor a 30 | 1.64 |
| 16 | 1.75 | | |

Fuente: Pozzi Azzaro, 1980

CAPÍTULO 4

**RESULTADOS Y
ANÁLISIS**

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Información generada

Una vez realizados los procedimientos descritos en la sección 3.6., para los tres ensayos a los que se sometieron las probetas de hormigón, se procedió a ordenar y tabular los datos obtenidos para las posteriores determinaciones y análisis.

Para el ensayo de resistencia mecánica a la compresión, se organizaron las probetas ensayadas según la filosofía con la cual fueron diseñadas y elaborados, caracterizándolas con una inicial para facilitar su identificación (“GC” para hormigón con grava chancada o “CR” para hormigón con canto rodado), teniendo 27 especímenes para cada filosofía, además, se ordenaron según la resistencia de diseño con la cual fue realizada la dosificación, por lo tanto se ensayaron 9 probetas por cada dosificación, las cuales se dividieron según la edad de la muestra 7, 14 y 28 días.

Para el ensayo de capacidad y velocidad de succión capilar de agua, del hormigón, de igual manera se ordenaron las probetas según la filosofía de diseño y la dosificación.

Para el análisis de las probetas de hormigón utilizando la tomografía computarizada en rayos-x, se ensayó una probeta por cada filosofía teniendo por lo tanto 6 probetas.

En anexos se presentan los valores obtenidos de cada ensayo realizado a las probetas de hormigón.

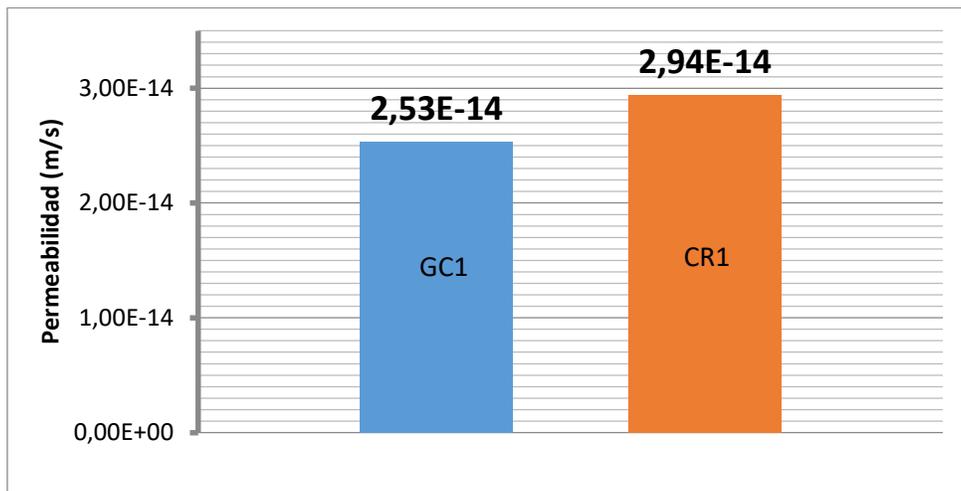
4.2. Resultados obtenidos

Para el análisis de la resistencia se realizaron los cálculos indicados. Los resultados están adjuntos en el anexo 3.

En cuanto al ensayo de permeabilidad del hormigón, se realizaron los cálculos descritos en el Anexo 4, adjunto al final del presente estudio.

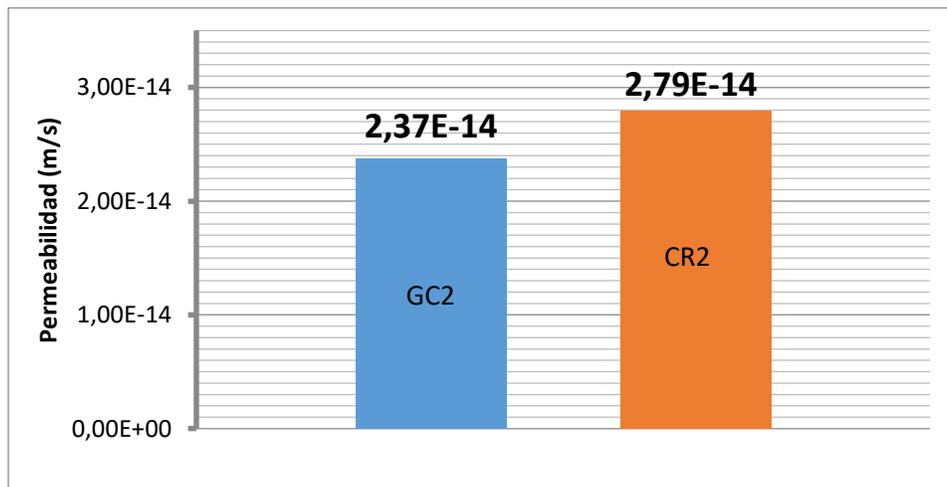
Finalmente se compararon los valores de permeabilidad obtenidos por cada filosofía de hormigón:

Permeabilidades para la dosificación 1 con Grava Chancada (GC1) y con Canto Rodado (CR1) con resistencia de diseño de 210 kg/cm²



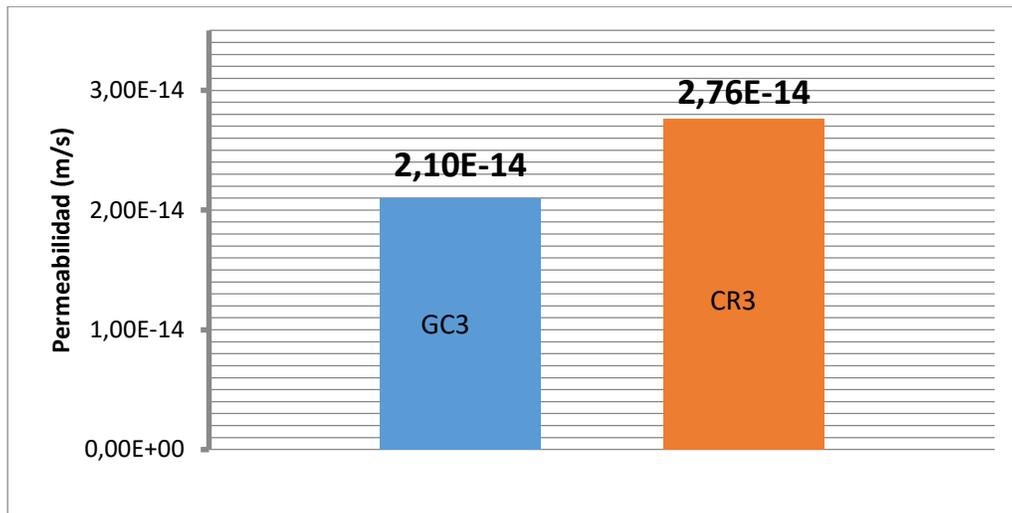
Fuente: Propia

Permeabilidades para la dosificación 2 con Grava Chancada (GC2) y con Canto Rodado (CR2) con resistencia de diseño de 240 kg/cm²



Fuente: Propia

Permeabilidades para la dosificación 3 con Grava Chancada (GC3) y con Canto Rodado (CR3) con resistencia de diseño de 270 kg/cm²



Fuente: Propia

Para el ensayo de porcentaje de vacíos del hormigón, se realizaron los cálculos descritos en el Anexo 5, adjunto al final del presente estudio.

Para el ensayo de la adherencia pasta-agregado, se realizaron los cálculos descritos en el Anexo 6, adjunto al final del presente estudio.

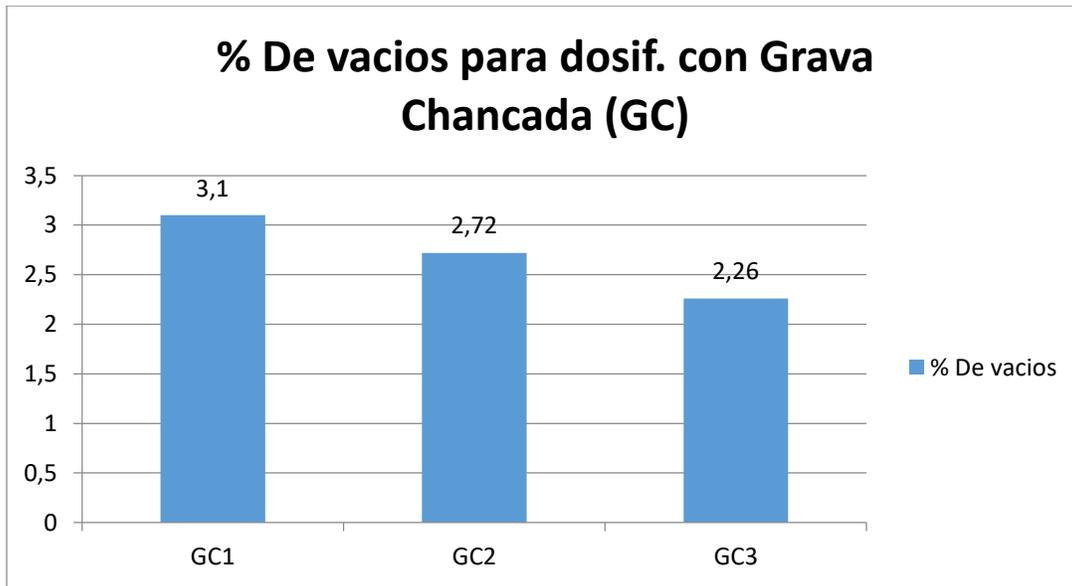
En cuanto al ensayo del contacto agregado-agregado, se realizaron los cálculos descritos en el Anexo 7, adjunto al final del presente estudio.

4.3. Contrastación de hipótesis

En base a los resultados obtenidos, y las comparaciones realizadas, se pudo observar claramente ciertas tendencias en ambas pruebas realizadas.

En el ensayo de resistencia mecánica a compresión, las probetas que fueron elaboradas con grava chancada, mostraron en todas las pruebas una mayor resistencia a las muestras de hormigón hechas con canto rodado.

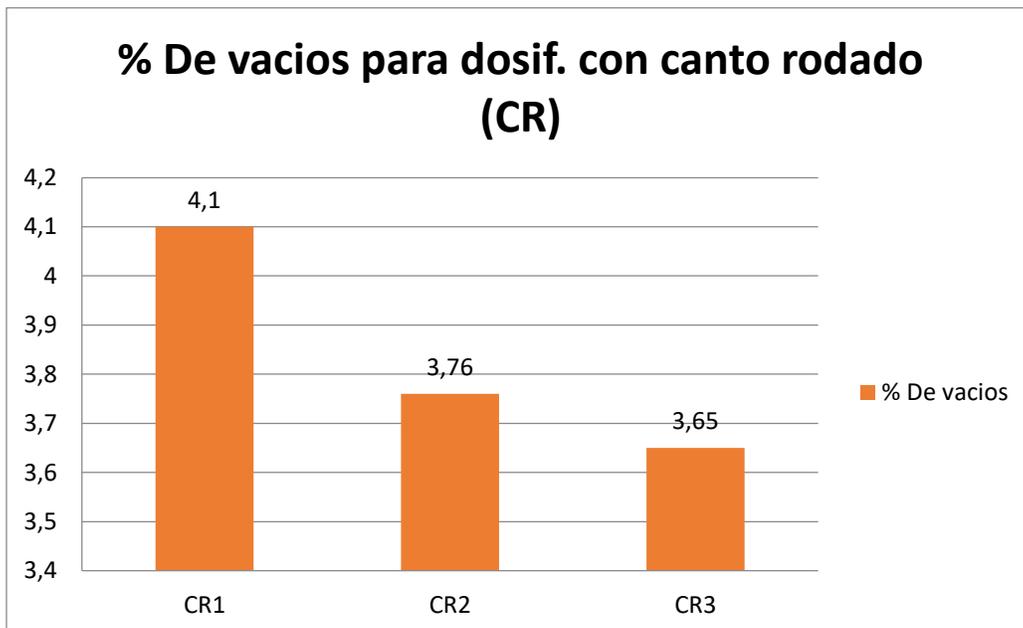
Grafica de vacíos de la dosificación con Grava Chancada (GC):



Fuente: Propia

Se puede observar claramente que la dosificación con GC1 posee más vacíos que la dosificación GC2 y la dosificación GC3 con una diferencia entre la primera y la tercera de 0,84 %.

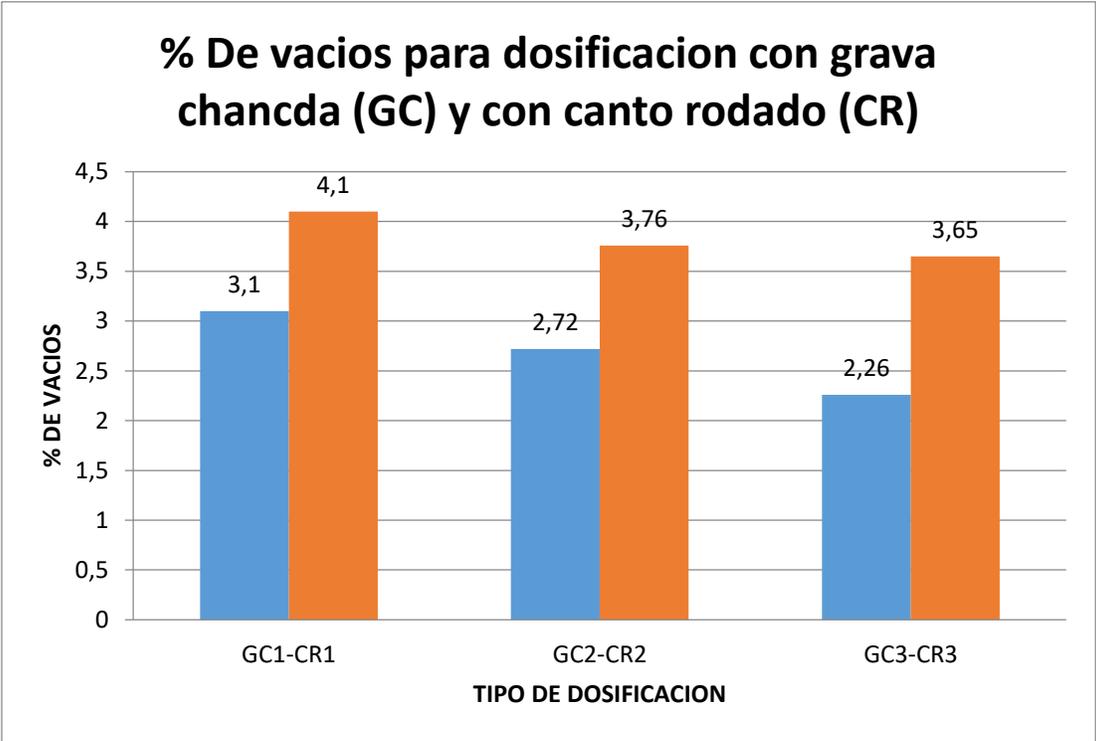
Grafica de vacíos de la dosificación con Canto Rodado (CR):



Fuente: Propia

La dosificación CR1 tiene mayor porcentaje de vacíos que la dosificación CR2 y la dosificación CR3 con una diferencia entre la primera y la última de 0.45 %.

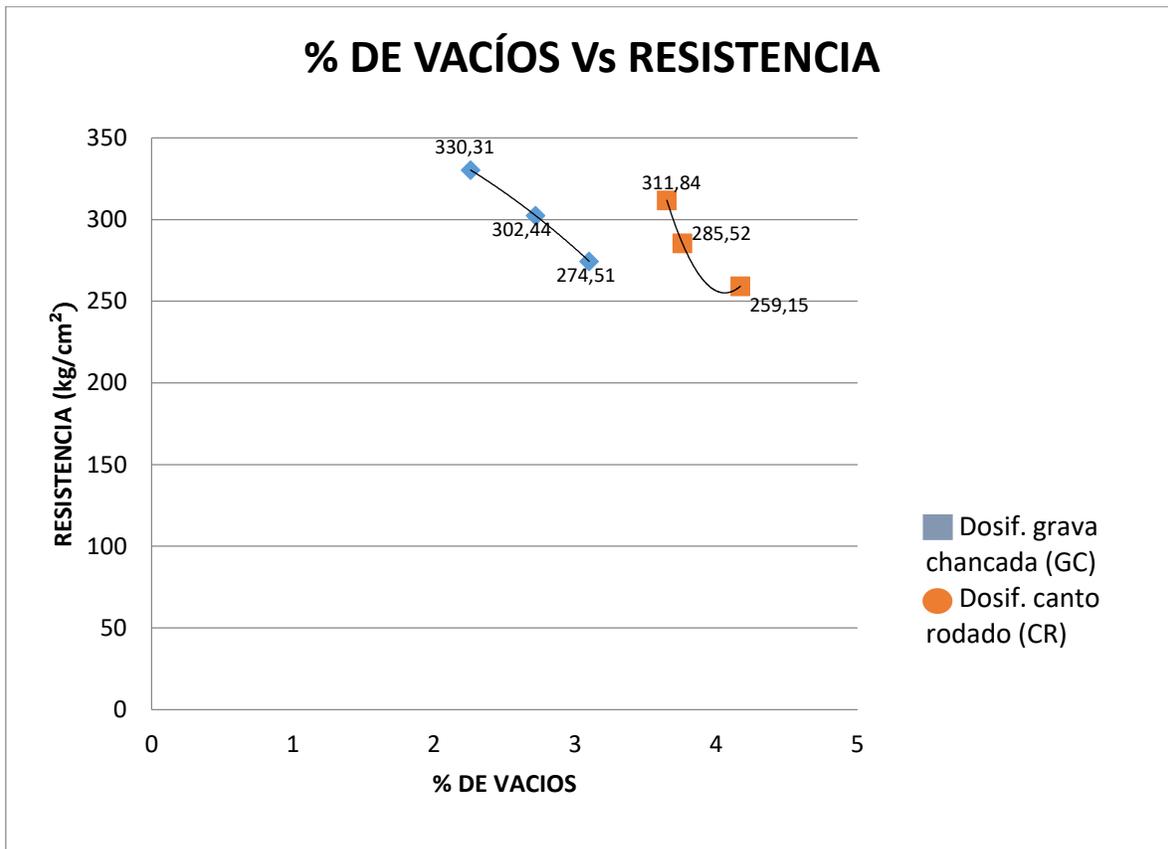
Grafica de vacíos de la dosificación con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



Fuente: Propia

Las dosificaciones con GC en todos los casos contienen menor porcentaje de vacíos en comparación a la dosificación con CR. La dosificación GC1 posee 1% más de vacíos que la dosificación CR1, la dosificación GC2 posee 1.04% más de vacíos que la dosificación CR2 y finalmente la dosificación GC3 posee 1.39% más de vacíos que la dosificación CR3.

Grafica porcentaje de vacíos Vs resistencia de la dosificación Grava Chancada (GC)-Canto Rodado (CR):



Fuente: Propia

La resistencia varía respecto a la cantidad de vacíos a menor porcentaje de vacíos mayor resistencia en las dosificaciones GC se puede observar mayores resistencias y menores porcentajes de vacío respecto a las dosificaciones CR.

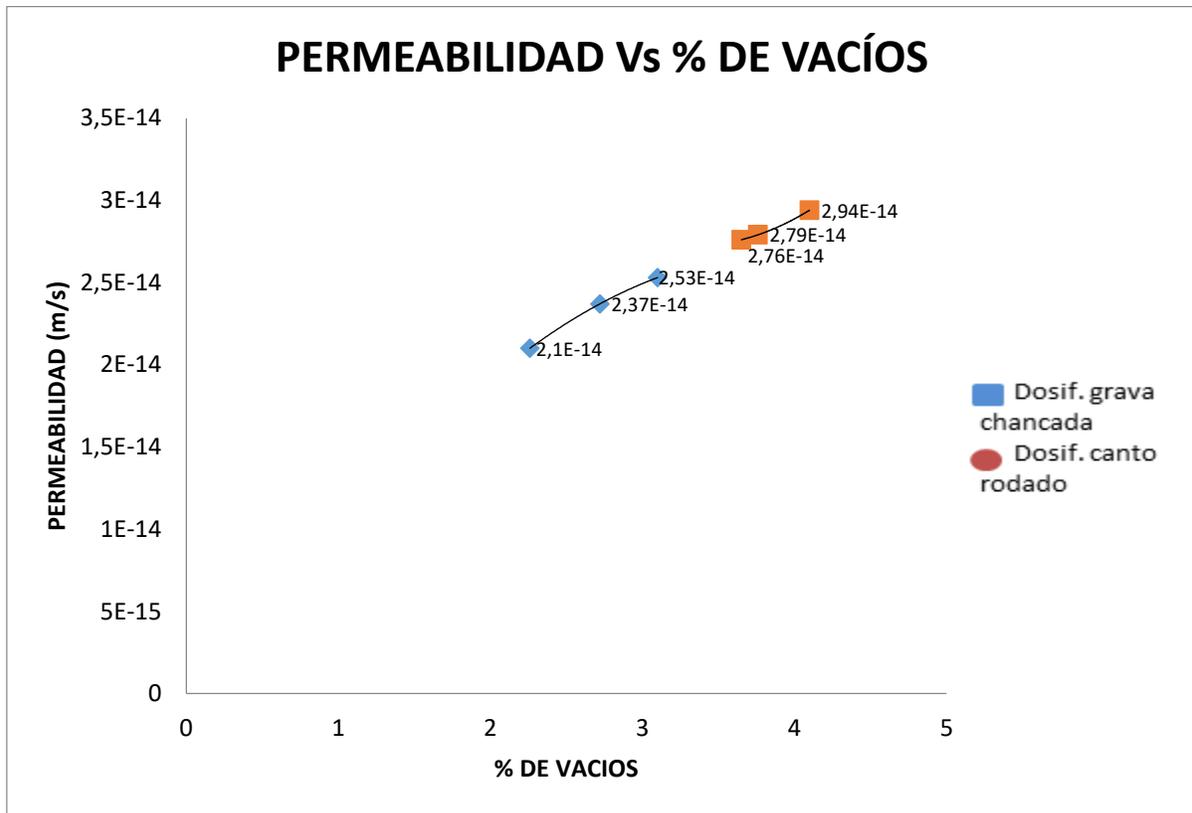
Para la dosificación con Grava Chancada (GC) se obtuvo la siguiente ecuación:

$$y = -15,373x^2 + 15,969x + 372,74$$

Para la dosificación con Canto Rodado (CR) se obtuvo la siguiente ecuación:

$$y = 336,45x^2 - 2732,4x + 5802,7$$

Grafica porcentaje de vacíos Vs permeabilidad Para dosificación Con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



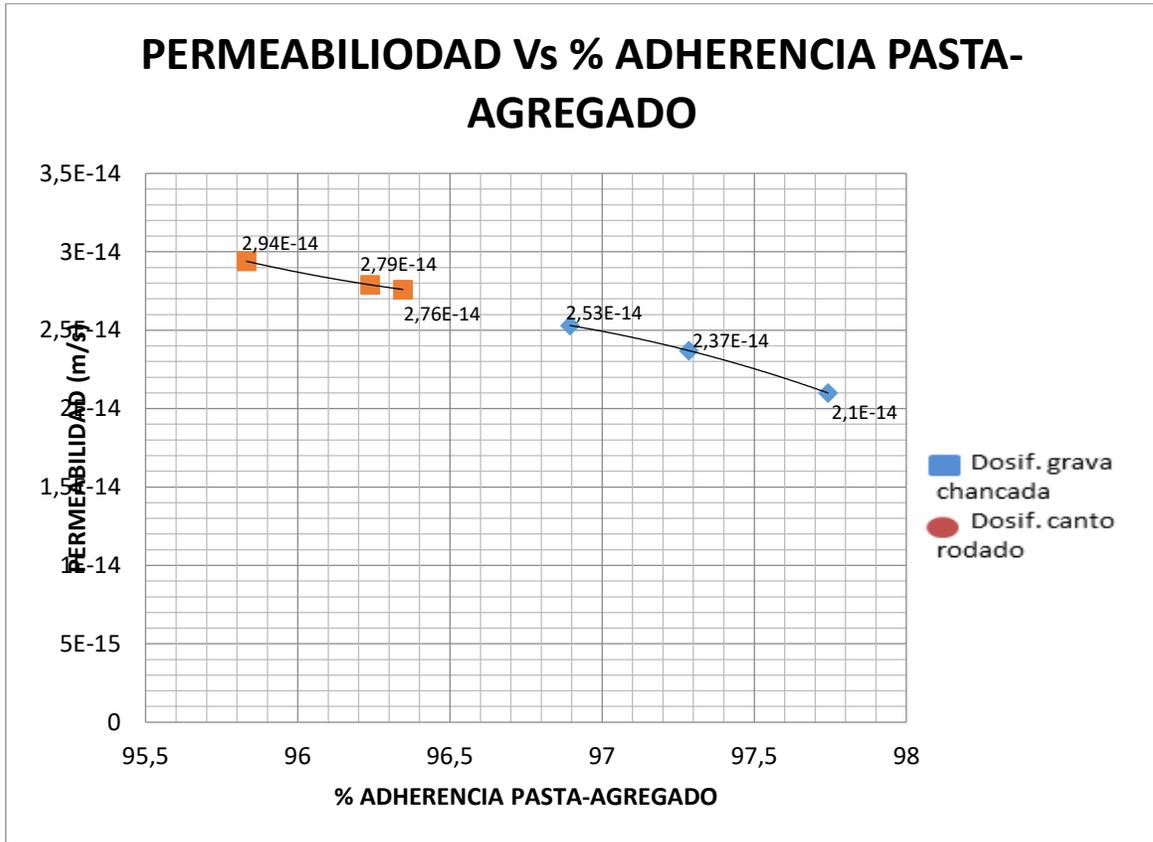
Fuente: Propia

El Hormigón con dosificación GC son menos permeables que con dosificación CR y esto se debe a que menor porcentaje de vacíos existe menor permeabilidad. De las gráficas permeabilidad VS % de vacíos se obtuvo las siguientes ecuaciones para dosificación:

Dosificación con Grava Chancada (GC): $y = -2E-15x^2 + 2E-14x - 4E-15$

Dosificación con Canto Rodado (CR): $y = 4E-15x^2 - 3E-14x + 7E-14$

Grafica % adherencia pasta-agregado Vs permeabilidad para dosificación Con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



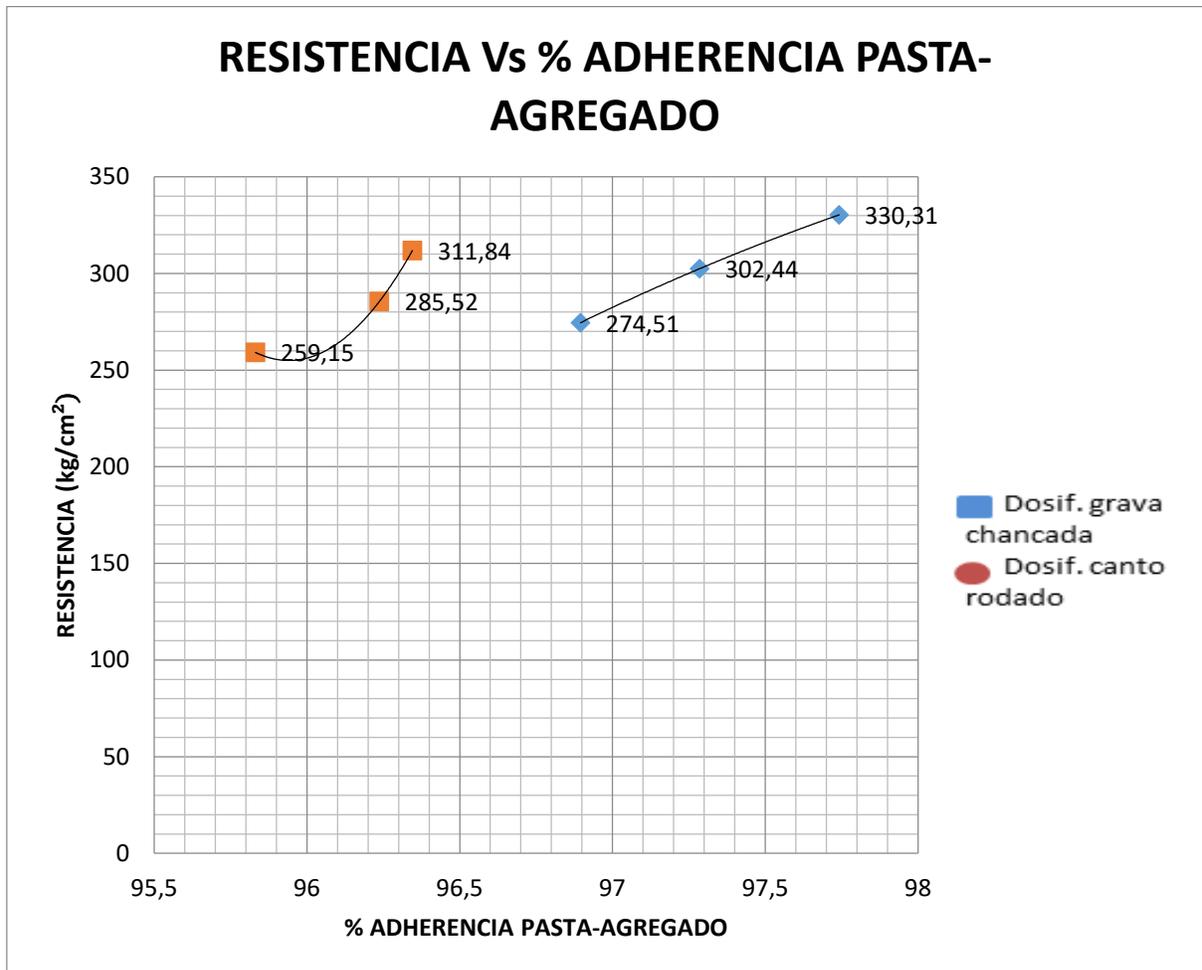
Fuente: Propia

En las gráficas se puede observar que cuando no hay una buena adherencia pasta-agregado la permeabilidad es mayor. Se obtuvieron las siguientes ecuaciones para cada dosificación:

Dosificación con Grava Chancada (GC): $y = -2E-15x^2 + 4E-13x - 2E-11$

Dosificación con Canto Rodado (CR): $y = 2E-15x^2 - 3E-13x + 2E-11$

Grafica % adherencia pasta-agregado Vs resistencia para dosificación Con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



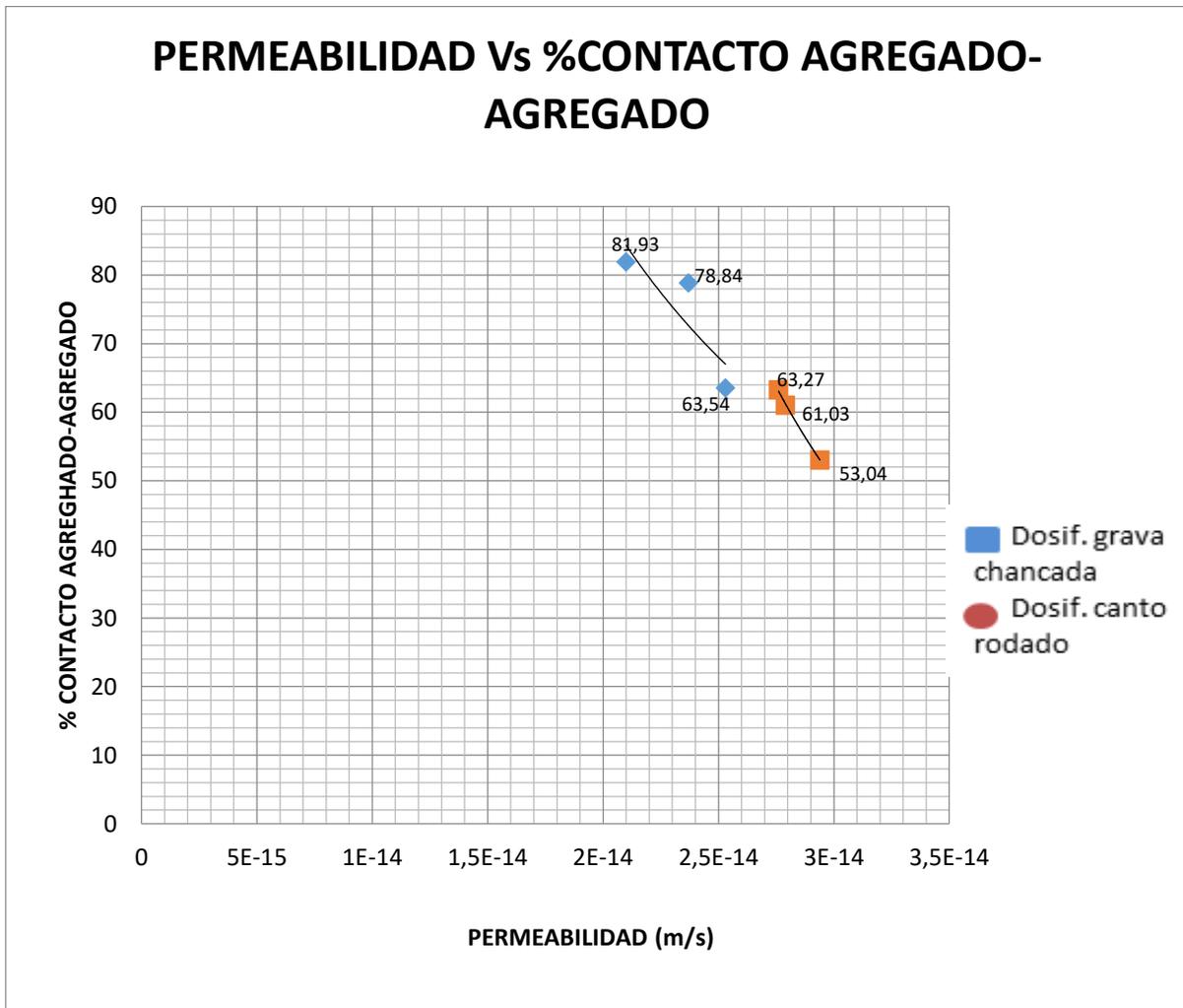
Fuente: Propia

La resistencia también depende de la adherencia pasta-agregado. Si la adherencia es buena la resistencia será mayor como se puede observar en la gráfica. Se obtuvo las siguientes ecuaciones:

Dosificación con Grava Chancada (GC): $y = -12,551x^2 + 2508,8x - 124976$

Dosificación con Canto Rodado (CR): $y = 347,77x^2 - 66730x + 3E+06$

Grafica % contacto agregado-agregado Vs permeabilidad para dosificación con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



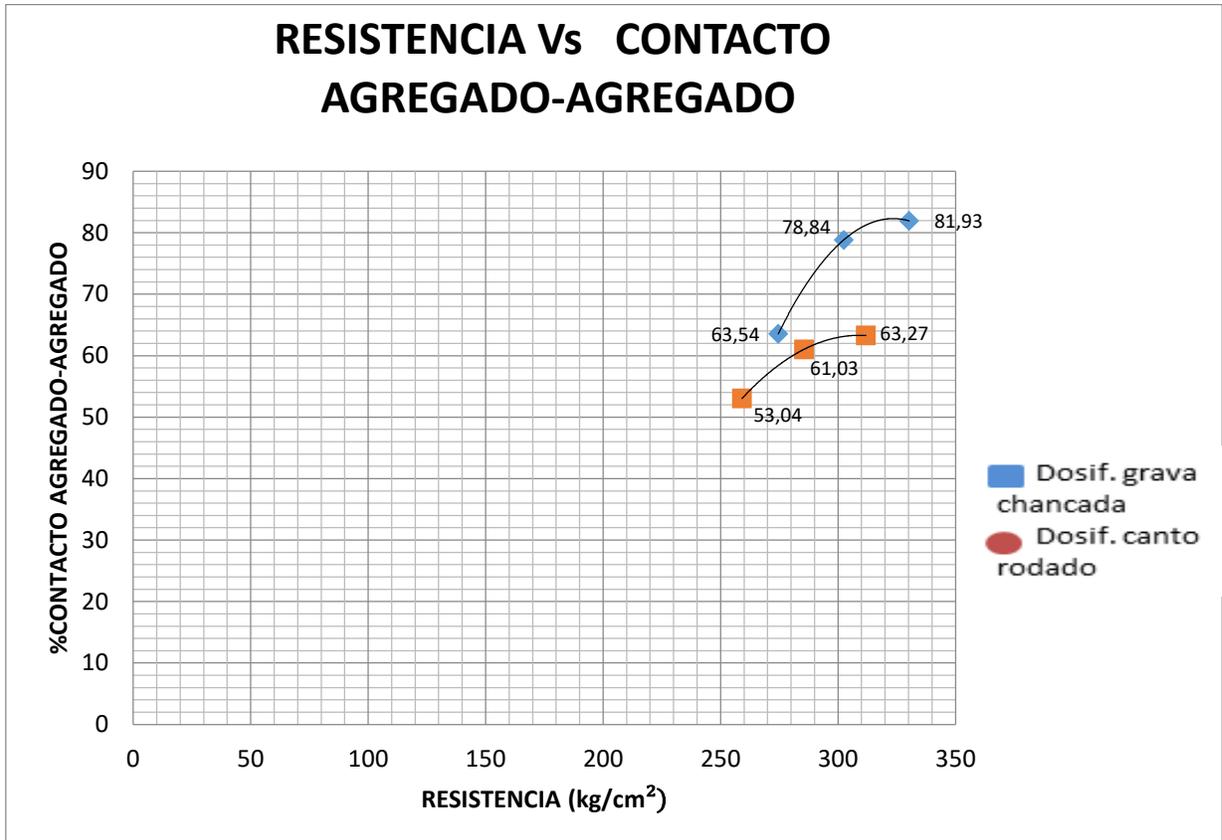
Fuente: Propia

Para que un hormigón tenga poca permeabilidad el contacto agregado-agregado debe ser muy bueno, porque a mayor contacto agregado –agregado menor permeabilidad. De esta relación se obtuvo las siguientes ecuaciones:

Dosificación con Grava Chancada (GC): $y = 1E-15x^{-1,233}$

Dosificación con Canto Rodado (CR): $y = 3E-36x^{-2,756}$

Grafica % contacto agregado-agregado Vs resistencia para dosificación con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



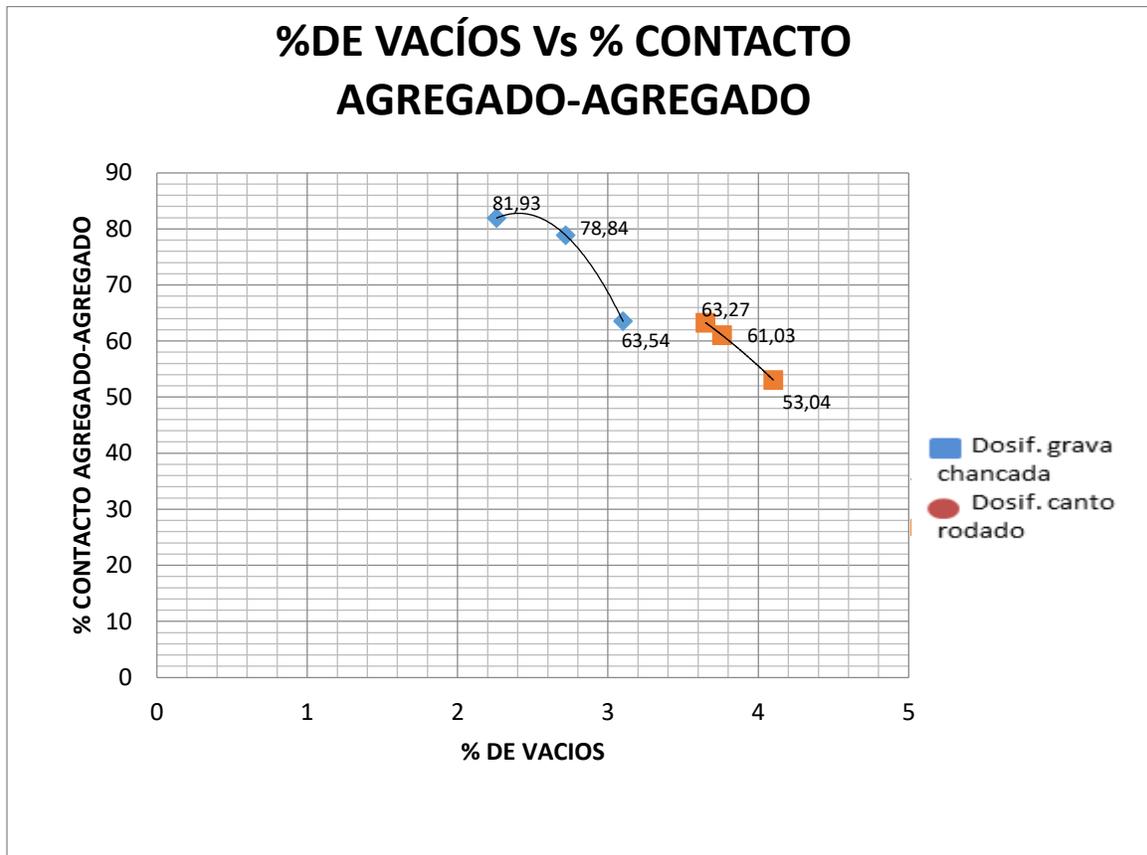
Fuente: Propia

El contacto agregado-agregado es un factor que incide en la resistencia del hormigón porque a mayor contacto agregado-agregado habrá una mayor resistencia. Las ecuaciones que se obtuvieron son las siguientes:

Dosificación con Grava Chancada (GC): $y = -0,0078x^2 + 5,0654x - 736,92$

Dosificación con Canto Rodado (CR): $y = -0,0041x^2 + 2,5554x - 331,46$

Grafica % contacto agregado-agregado Vs % de vacíos para dosificación Con Grava Chancada (GC) y con Canto Rodado (CR):



Fuente: Propia

Cuando en el hormigón existe un buen contacto agregado-agregado el porcentaje de vacíos será bajo eso quiere decir que a mayor contacto agregado-agregado habrá un menor porcentaje de vacíos. Para esta relación se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Dosificación con Grava Chancada (GC): $y = -39,935x^2 + 192,16x - 148,38$

Dosificación con Canto Rodado (CR): $y = -6,9697x^2 + 31,282x + 41,945$

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Este artículo presenta algunos hallazgos obtenidos mediante el uso de la Tomografía Computarizada en Rayos-X para el estudio de la estructura interna de probetas de hormigón con 2 filosofías diferentes. De acuerdo con los resultados derivados de investigaciones recientes, se presentan las siguientes conclusiones:

- El aporte que tiene este trabajo al la ingeniería civil es que la determinación de las propiedades de los materiales empleados en mezclas de hormigón es fundamental para diseñar y construir estructuras confiables, durables y económicas. La técnica de la Tomografía Computarizada en Rayos -X descrita en este documento hace parte de un nuevo grupo de metodologías no destructivas aplicadas al estudio de materiales empleados en estructuras y son una muestra de la tendencia mundial que existe para su caracterización, modelación y análisis. La tomografía computarizada con rayos-X es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos. Su empleo ha sido especialmente eficiente en el estudio de la microestructura de mezclas de hormigón, en particular en lo concerniente a la determinación de la estructura de vacíos (tamaño) y al análisis de transporte de agua al interior del material.
- Se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo de las imágenes obtenidas por tomografía computarizada. Cada una de las 60 imágenes obtenidas fue analizada minuciosamente por lo tanto los valores obtenido solo tiene una margen de error mínimo.
- Las evaluaciones disponibles sugieren que los resultados obtenidos son, en general, comparables con los conocimientos teóricos existentes en términos de su estructura interna. Se han evidenciado aspectos similares en cuanto se refiere a cómo afecta en la mezcla de hormigón la forma de los agregados. No obstante, se ha concluido que los especímenes estudiados no son comparables en cuanto al porcentaje de vacíos con respecto a los valores ya existentes según el comité 211 de ACI donde dice que para un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " el porcentaje de vacíos es de 2% pero los resultados obtenidos luego del análisis de las imágenes obtenidas por la Tomografía Computarizada en Rayos-X son mayores a este valor en todas las dosificaciones realizadas que varía desde un 2,26% a 4,1% la razón 65 los resultados fueron mayores es porque

la tomografía computarizada es una técnica más exacta debido a que se puede observar cada vacío existente en el hormigón.

- Para el cálculo del porcentaje de vacíos y del contacto agregado-agregado en el hormigón, se utilizó el programa eFilm lite con el cual se pudo obtener el área que ocupa cada vacío. Esta técnica es muy exacta porque se puede visualizar claramente cada vacío que existe en la imagen.
- El porcentaje de vacíos para las dosificaciones con grava chancada es menor en comparación a las dosificaciones con canto rodado.
- Se pudo evidenciar que a mayor número de vacíos menor resistencia. Estos resultados podremos tener en cuenta cuando se desee hacer estructuras que requieran resistencias altas, el hormigón debe tener poco porcentaje de vacíos.
- Se demostró que a mayor permeabilidad mayor porcentaje de vacíos. Los vacíos son conductores del agua entonces es obvio que cuando se tenga hormigones muy permeables es porque existe una gran cantidad de vacíos.
- La permeabilidad es inversamente proporcional al porcentaje de adherencia pasta-agregado. Los vacíos aparecen cuando la adherencia pasta-agregado no es buena entonces al haber vacíos habrá mayor permeabilidad.
- La resistencia es directamente proporcional al porcentaje de adherencia pasta-agregado.
- En cuanto a la permeabilidad y el porcentaje de contacto agregado-agregado los resultados fueron que a mayor porcentaje de contacto agregado-agregado menor permeabilidad.

- Cuando en la mezcla existe un buen contacto agregado-agregado la resistencia es

mayor. Esto corrobora a lo que la teoría dice que cuando se utiliza agregados de forma irregulares y textura rugosa (grava chancada), tendrá un mayor contacto agregado-agregado y por lo tanto mayor resistencia.

- El porcentaje de contacto agregado-agregado es inversamente proporcional al porcentaje de vacíos. Si deseamos obtener hormigones con poca cantidad de vacíos debemos utilizar grava chancada para que exista una buena adherencia pasta-agregado y un buen contacto agregado-agregado.

RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados derivados de investigaciones recientes, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Se cree posible que la Tomografía Computarizada sea sensible al analizar las características interna del hormigón endurecido, tal vez si se consideran más cortes sobre una misma muestra de manera que se obtenga una reconstrucción de la muestra entera en cortes de 1 o 2 mm.
- Una parte importante de su aplicabilidad depende del uso de programas de análisis de imagen con herramientas adecuadas. Sin ellas no se podría obtener un rendimiento elevado.
- Una de las ideas básicas a considerar en el diseño de mezclas es que el porcentaje de vacíos, y por lo tanto el de pasta de cemento, sea el menor posible, por razones de tipo técnico y económico.

- Es importante tener presente que las dosis excesivas de cemento no conducen a la mejoría del hormigón, sino al empeoramiento de las propiedades físico-mecánicas de éste. En particular, la resistencia a compresión disminuye a medida que aumenta el contenido de cemento, para una relación agua/cemento constante. Es decir, cuanto mayor es el volumen de pasta y, por lo tanto, menor el de áridos, más se reduce la resistencia.
- En el diseño de mezclas no se debe olvidar que la durabilidad es un requisito tan importante como la resistencia y trabajabilidad, de manera que se tomaran las medidas necesarias, en función del tipo de ambiente al que vaya a estar expuesto el hormigón, para que el periodo de vida útil sea el establecido.