

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En la actualidad del desarrollo tecnológico a pasos acelerados y la globalización que viene experimentando el planeta, el hormigón se constituye en uno de los principales e insoslayables materiales utilizados en la construcción, por la aparente poca necesidad de mantenimiento de las estructuras construidas con él, bajo condiciones normales basta recorrer las calles de nuestro país para observar que la gran mayoría de infraestructura física que existe tales como centros educativos, centros comerciales, viviendas, infraestructura deportiva, vías terrestres, puentes, hospitales, plazas, aeropuertos, están basadas en hormigón y/o “hormigón armado”; no se puede construir sin pensar en las propiedades del mismo.

En los últimos años la palabra durabilidad y calidad, ha venido ganando cada vez más importancia en la construcción, por el hecho de que se ha descubierto que entre mayor sea la capacidad del material de resistir las condiciones de ataques físicos mecánicos y químicos, mayor será el tiempo de servicio del mismo, “su variación en el tiempo sin modificaciones esenciales en su comportamiento”. Esto tiene gran importancia en la economía nacional ya que en países desarrollados y en vías de desarrollo se invierten miles de millones de dólares en mantenimiento y rehabilitación de obras de infraestructura.

En la actualidad los parámetros de durabilidad han adquirido tanta importancia como los de resistencia y calidad, siendo durabilidad la capacidad de la mezcla endurecida de soportar esfuerzos sin deteriorarse, las sollicitaciones provocadas por agentes físicos y químicos, que pueden agredir al hormigón, no sólo en su superficie, sino también en el interior de su masa. La posibilidad de que el ataque se produzca en el interior del hormigón, se debe a la existencia de los poros que se forman como consecuencia del fenómeno de exudación.

En los casos en que el hormigón debe estar en contacto con líquidos, los mismos pueden introducirse en el interior de la masa del hormigón, utilizando a ese efecto, las vías de acceso que les ofrecen los poros, una vez en el interior, esos líquidos pueden actuar agresivamente sobre el hormigón de las formas siguientes:

Poniendo en contacto sustancias químicas en solución en el agua, que puedan reaccionar con compuestos hidratados del cemento y den como resultado sustancias solubles que siguen el camino inverso, restando cohesión a la pasta cementicia (lixiviación de la cal por aguas ácidas, puras o carbónicas agresivas), formando compuestos expansivos que provoquen esfuerzos de tracción, los que al no ser soportados por el hormigón, traen como consecuencia su agrietamiento (reacción de sulfato sobre AC3; se obtiene sulfoaluminato de calcio, Sal de Candlot con gran aumento de volumen), acción física de tracción, provocada por aumento de volumen del agua contenida en los canales capilares, cuando ésta se congela, debido a bajas temperaturas (Palazzi,2002).

## **1.2. El problema**

### **1.2.1. Planteamiento**

Está demostrado que en el siglo XXI la ciencia seguirá generando nuevas investigaciones en diferentes campos, algunas de ellas están relacionadas con la durabilidad del hormigón, concepto traducido en un desarrollo tecnológico en una variada gama de actividades de impacto para las obras donde se utiliza el hormigón.

De acuerdo a la práctica constructiva, la resistencia, durabilidad y calidad del hormigón depende mucho de sus materiales constituyentes; los agregados, cemento y agua. Estos elementos constituyentes muchas veces son expuestos a agentes químicos y ambientales dando origen a problemas de deterioro de estructuras. El agua puede ser uno de los ambientes más agresivos que causan la desintegración.

Basados en estudios realizados; son múltiples y diversos los factores que conducen a la durabilidad del hormigón, ésta se puede determinar por agentes externos e internos propios del hormigón. Los agentes externos son aquéllos provenientes del medio en el

cual se encuentre el elemento, que implican el ingreso de fluidos agresivos que se encuentran en su ambiente circundante, seguido de procesos físicos o químicos que atacan provocando una perturbación de su estructura y superficie, los agentes de tipo interno o propios del hormigón provocan un daño algo similar, influenciado principalmente por el cambio de humedad.

Identificando que el índice de sorptividad es una de las variables fundamentales para evaluar la durabilidad del hormigón están íntimamente relacionadas con su compacidad, porosidad, absorción y penetración por el agua y otros agentes que son motivo de otro estudio.

En consecuencia, se formula la siguiente pregunta científica:

### **1.2.2. Formulación**

**¿Cómo se puede analizar el comportamiento del hormigón ante el índice de sorptividad y sus efectos?**

El comportamiento del hormigón se puede analizar a través de sus propiedades y características que afecten en el índice de sorptividad. Si se conociera el índice de sorptividad del hormigón y su efecto en la resistencia; de manera preventiva se pueden emplear en la construcción hormigones bien elaborados.

### **1.2.3 Sistematización**

Analizar el comportamiento del hormigón ante el índice de sorptividad y su efecto en la resistencia.

## **1.3. Objetivos**

El trabajo de investigación pretende lograr a los siguientes objetivos:

### **1.3.1. Objetivo general**

Realizar una investigación con el propósito de determinar el índice de sorptividad en el hormigón cuya resistencia sea de 21 MP y su efecto en la resistencia a compresión simple, con la utilización de agregados y cementos de nuestro medio, con la finalidad

de establecer elementos técnicos que proporcionen información y de alguna manera prevenir problemas que afectan al hormigón.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Sintetizar el estado del arte sobre la teoría y la práctica (experimental) en relación con el índice de sorptividad.
- Realizar un muestreo de materiales para la investigación en base a criterios de mayor utilización en el medio regional.
- Realizar el ensayo ASTM C-1585 que permite determinar el índice de sorptividad, para hormigones elaborados con cemento el puente y agregados del Temporal, Rancho y Camacho.
- Establecer correlaciones entre el índice de sorptividad, índice de absorción y resistencia a compresión simple.
- A partir de las correlaciones ya conocidas establecer los efectos del índice de sorptividad en el hormigón.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

### **1.4. Justificación**

El trabajo de investigación se elabora por las siguientes razones:

#### **1.4.1. Académica**

El trabajo de investigación permite encontrar las correlaciones entre propiedades importantes en el hormigón y su relación con la sorptividad, sabiendo que este indicador de condición del hormigón, cambios que sufre el hormigón; si bien esta conceptualizado y normalizado los ensayos que miden las propiedades del hormigón, en nuestro medio no hay investigaciones frecuentes al respecto y menos aún con los materiales de la región, por lo que los resultados de la investigación tendrán un aporte importante en lo académico por el proceso metodológico y los resultados que servirán para tomar en cuenta en las construcciones ingenieriles.

### **1.4.2. Técnica**

Es de interés en todas las construcciones tener la mayor durabilidad, calidad y resistencia en las estructuras de hormigón y los menores riesgos de que existan agentes externos que afecten a la durabilidad del hormigón, por tanto, cualquier metodología que permita determinar los indicadores como la sorptividad cuya influencia en otras propiedades que están relacionadas con la durabilidad del hormigón.

Desde el punto de vista técnico realizar el ensayo de sorptividad, relacionar con propiedades del hormigón, permite obtener indicadores que sirvan como elemento de referencia para hormigones similares.

### **1.4.3. Social**

El trabajo de investigación propone en base a teorías existentes, contribuir con innovaciones técnicas y académicas, para ampliar conocimientos de temas de mucha importancia para el hormigón, sobre todo temas preventivos para la durabilidad del hormigón y así evitar gastos económicos en rehabilitaciones y mantenimiento de estructuras.

## **1.5. Hipótesis**

- El índice de sorptividad tiene una correlación relativamente fuerte con la propiedad de la resistencia a compresión simple del hormigón.
- Tomando en cuenta la hipótesis anterior, se puede evaluar el comportamiento y calidad del hormigón en base a correlaciones mencionadas.

## **1.6. Alcance de estudio**

### **1.6.1 Medios y metodología**

#### **¿Qué es una metodología experimental?**

El tipo de estudio es una aplicación investigativa en la cual se ejecutarán ensayos de laboratorio, basado en el ensayo ASTM C1585 Medida del índice de absorción de agua en el hormigón, para determinar la absorción del hormigón elaborado con los agregados

naturales de la región. El mismo quedará delimitado en una línea de investigación del método empírico y método teórico, con la elaboración de probetas de hormigón con los mismos agregados se analizarán su resistencia a los 7 y 28 días en relación al índice de sorptividad.

A continuación, se muestra el desarrollo de la investigación:

- Con la norma ASTM C1585 se practicarán el ensayo para determinar la absorción de agua en el hormigón para saber el incremento en peso de las muestras y así disponer con los valores del índice de absorción, índice de sorptividad.
- Elaboración de mezclas con diferentes agregados cuyo porcentaje de absorción a partir del origen del agregado sea diferente, para una misma resistencia.
- Evaluación y comparación entre el índice de absorción del hormigón y el porcentaje de absorción de los agregados de la región empleados, además la influencia en la resistencia del hormigón de acuerdo a los resultados adquiridos.

### **1.6.2 Restricciones y limitaciones.**

Según la norma ASTM C1585, se efectuará la prueba imprescindible con equipos del laboratorio de hormigón.

En cuanto a los materiales requeridos para las mezclas y para el ensayo del índice de absorción de agua en el hormigón; se utilizarán tres diferentes tipos de bancos de agregados naturales regionales para así obtener tres diferentes mezclas para una misma resistencia.

## **CAPÍTULO II**

# **SOBRE EL ÍNDICE DE SORPTIVIDAD Y SUS EFECTOS EN ALGUNAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN; ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

## **2.1. Concepto general del hormigón.**

El hormigón es el producto resultante de la mezcla homogénea en ciertas proporciones de pasta (cemento + agua) y agregados (arena, grava); por lo dicho anteriormente se puede definir como una piedra artificial, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo adquiriendo su resistencia de trabajo a la edad de 28 días.

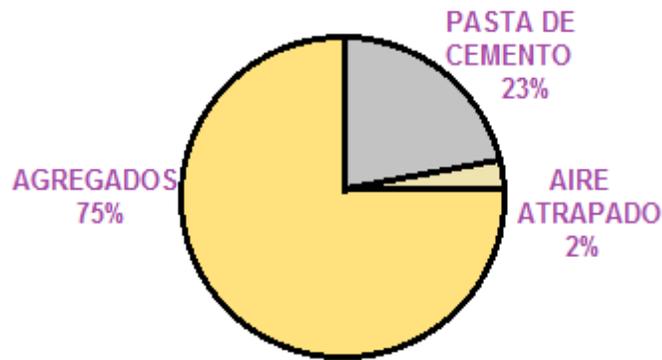
El hormigón cuyas propiedades es sin lugar a dudas el material mayormente empleado en la construcción, gracias a su fácil moldeo, su facilidad de incorporar otros materiales y su costo relativamente bajo, no ha perdido vigencia hasta la fecha y es considerado el material más popular y requiere de actividades bien definidas y cuidadosamente supervisadas para lograr el éxito garantizando y el cumplimiento de su resistencia a compresión simple, estabilidad volumétrica, su durabilidad, etc.

La pasta es el resultado de la combinación química del cemento y el agua. Se le considera la fase continua del hormigón, ya que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto.

## **2.2. Componentes del hormigón.**

Con una idea muy general se puede hablar de que los integrantes del hormigón se encuentran distribuidos tomando como base su peso en los porcentajes siguientes:

Pasta (cemento + agua) de un 23 a un 25 %, agregados (grava y arena) de 73 a 75% y aire atrapado 2% (Cottier, 1998).



*Grafica 2.1: Componentes del Hormigón en porcentaje*  
*FUENTE: Tecnología del concreto. Juan Luis. Cottier Caviedes. Pag.340*

El principal componente del hormigón, es el cemento Portland, el cual ocupa entre el 7% y el 12% del volumen de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y de cohesión que proveen buena resistencia a la compresión. El cemento Portland es producido mediante la calcinación de rocas de caliza y arcilla, elevadas a altas temperaturas.

El segundo componente, es el agua, ocupa entre el 14 y el 20% del volumen del hormigón y su función es hidratar al cemento Portland, y darle manejabilidad a la mezcla. La mezcla de cemento Portland y agua es llamada la pasta de cemento y sirve como lubricante de la mezcla fresca. Adicionalmente, la pasta endurecida provee resistencia mecánica y durabilidad del hormigón (Cottier, 1998).

La combinación del cemento con el agua se la denomina Zona Interfacial de Transición: siendo la matriz de cemento hidratada que se halla en las zonas superficiales de los áridos y que abarca entre 50 y 100  $\mu\text{m}$  desde la superficie del árido. Es una fase que condiciona un alto número de propiedades de estos materiales (durabilidad, resistencia). Básicamente se ve diferencia de la matriz, en su porosidad y en las características de los productos de hidratación presentes, siendo de forma general, esta zona interfacial de transición la parte más débil de todos esos materiales utilizados.

El tercer componente, son los agregados, los cuales ocupan entre el 59% y el 68% del volumen de la mezcla. Por lo anterior, las características y propiedades de los agregados ejercen una notable influencia en las propiedades del hormigón, son esencialmente materiales, naturales o artificiales, de forma granular, que por

conveniencia práctica ha sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). Los agregados, son considerados una llenante de la mezcla, que controlan los cambios volumétricos de la pasta de cemento y que también proveen resistencia.

El agregado debe estar constituido por partículas limpias, resistentes y durables, que desarrolle buena adherencia con la pasta de cemento, libres de recubrimientos de arcilla y de impurezas que interfieran el desarrollo de la resistencia del cemento.

Adicionalmente, el hormigón también contiene alguna cantidad de aire atrapado (usualmente entre 1% y 2% del volumen de la mezcla).

### **2.2.1. Agregados.**

Los agregados son el material inerte que se añaden a la pasta de cemento ocupan la mayor parte en el concreto un 75% de su volumen y su influencia es de primer orden en el comportamiento del hormigón tanto en su estado fresco como endurecido, sin embargo, la experiencia señala que la mayoría de los agregados son activos cuando se combinan con el cemento, agua y aditivos. Esta actividad puede involucrar cambios físicos, químicos o térmicos o combinación de los mismos.

Ellos son materiales granulares, que provienen la mayor parte de veces de roca natural, roca chancada o grava natural y arena. Aunque no son los únicos materiales usados como agregados, ellos son los de mayor uso.

Los agregados pueden limitar la resistencia del hormigón, pero más frecuentemente afectan la durabilidad y el comportamiento estructural del hormigón.

Son características de los agregados, su peso específico, su peso unitario compactado y suelto (incluyendo los espacios vacíos). Los agregados se suponen limpios, secos, saturados y sueltos. Su absorción puede llegar al 25 % de su propio peso. No deben contener partículas sueltas, ni deben ser chatos, alargados o blandos.

Por su forma, los agregados pueden ser esféricos o poliédricos, debiendo desecharse aquéllos de forma lajosa, alargada, por su menor resistencia. Por su textura, son mejores aquéllos de superficies rugosas por brindar mejor adherencia. En cambio, los de superficies lisas mejoran la trabajabilidad del hormigón (Neville, 1999).

Es de vital importancia considerar las características de los agregados para ser incluidos en el hormigón. Las características de los agregados que influyen en el hormigón se evidencian en la siguiente tabla.

<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS QUE INCIDEN EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN</b>	
<b>Propiedades del hormigón</b>	<b>Características de los agregados</b>
Durabilidad	Composición mineralógica Textura superficial
Resistencia	Módulo de elasticidad
Cambio de volumen	Coefficiente de dilatación térmica
Peso específico	Resistencia a la tensión
Módulo de elasticidad	Absorción
Resistencia al desgaste	Permeabilidad
Dosificación	Estructura de los poros
Trabajabilidad	Estabilidad de volumen
Bombeabilidad	Granulometría
Acabado del concreto	Tamaño máximo
Tiempo de fraguado	Finos
Exudación	Forma
Economía	Estabilidad química
	Sales solubles
	Adherencia en los granos
	Partículas de arcilla
	Materia orgánica

	Sensibilidad al agua
	Solubilidad en agua

*TABLA 2.1: Características de los Agregados que inciden en las propiedades del Hormigón  
FUENTE: Tecnología del concreto. Juan Luis. Cottier Caviedes. Pág.340*

Los áridos constituyen el esqueleto del hormigón, y son responsables de buena parte de las características del mismo pues son un elemento mayoritario.

Los áridos deben estar constituidos por partículas duras, de formas adecuadas (sin formas lajosas o aciculares), inertes y no reactivas. Además, no deben contener arcillas, limos ni materias orgánicas. No deben ser heladizos, es decir, no deben deteriorarse con los ciclos de heladas (Cottier, 2006).

En general, los áridos de baja densidad son pocos resistentes y porosos.

Normalmente los áridos se clasifican en fracciones definidas por su tamaño máximo y su tamaño mínimo. El tamaño máximo de 5 mm marca la separación entre arenas (árido fino) y gravas (árido grueso).

### **2.2.1.1. Granulometría y forma.**

La granulometría, forma y tamaño de los áridos influyen sobre su resistencia y calidad del hormigón.

Para conseguir una granulometría adecuada se debe dosificar los áridos, de manera que se obtenga una granulometría lo más continúa y compacta posible. Para conseguirlo debe separarse en diferentes fracciones, para que estas puedan ser mezcladas en las proporciones adecuadas.

En la tabla 2.2 se recogen las condiciones mínimas que deben cumplir los áridos para su empleo en hormigones.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>ÁRIDO FINO</b>	<b>ÁRIDO GRUESO</b>
<b>DUREZA</b>		

Partículas blandas (UNE 7,134)	-	<% 5
Dureza de la arena (UNE 83,115)	≤ 40	-
Desgaste del árido (UNE 83,116)	-	≤ 40
<b>LIMPIEZA</b>		
Terrones de arcilla (UNE 7,133)	<1	<% 52,0
Equivalente de arena (UNE 83,131)	>57	-
Partículas ligeras (UNE 7,244)	< 0,5	<1
<b>RESISTENCIA AL HIELO</b>		
Absorción de agua (UNE 83,133 y 83,134)	≤ 5 %	
Ciclos con sulfato sódico (UNE 7,136)	<% 51	<% 51
Ciclos con sulfato magnésico (UNE 7,136)	< 12	<% 81
<b>SUSTANCIAS PERJUDICIALES</b>		
Compuestos de azufre (UNE 83,120)	<% 4,0	<% 4,0
Reactividad con los álcalis (UNE 7,137)	NO	

*TABLA 2.2: Condiciones físicas, químicas y mecánicas a cumplir por los áridos.  
FUENTE: Manual de consejos prácticos sobre el hormigón, ANEFHOP, Pag.17*

El contenido de partículas muy finas (de tamaño inferior a 0,08mm) en el árido, obliga a aumentar la cantidad de agua necesaria para alcanzar una docilidad dada del hormigón, disminuyendo en consecuencia las resistencias finales de éste. Por esta razón dicho contenido se limita a los siguientes valores:

- ✓ Árido grueso < 1%
- ✓ Árido grueso calizo de machaqueo < 2%
- ✓ Árido fino < 6%
- ✓ Arenas calizas de machaqueo < 15% Condiciones normales < 10% ciclos hielo-deshielo o en ambientes marinos

En nuestro medio es común el uso de dos tipos de agregados; agregado fino(arena) y material grueso (grava).

#### **a. Arena**

Es el material granular fino resultado de la desintegración natural de rocas o del triturado de agregado grueso. Existen varias definiciones de tamaños para partículas de arena. La más común en nuestro medio explica a la arena como aquel material granular que pasa la malla N°4(malla con abertura ¼”), y se retiene en la malla N°200.

Existen varios tipos de arenas, cada una de las cuáles con características de graduación diferentes.

#### **b. Grava**

Es el producto de la desintegración de grandes rocas. Son partículas más grandes que las arenas: El punto de división generalmente en el de malla N°4.

Existen diferentes tipos de gravas entre los cuáles se puede mencionar a gravilla, grava de rio, grava de banco, asimismo existe la piedra triturada que es resultado del machaqueo mecánico de piedra sólida.

### **2.2.1.2. Propiedades de los agregados.**

#### **2.2.1.2.1. Propiedades físicas.**

##### **a. Densidad**

Depende de la gravedad específica de sus constituyentes sólidos como de la porosidad del material mismo. La densidad de los agregados es especialmente importante para los casos en que se busca diseñar hormigones de bajo o alto peso unitario.

Las bajas densidades indican también que el material es poroso y débil y de alta absorción.

### **b. Porosidad**

La palabra porosidad viene de poro que significa espacio no ocupado por materia sólida en la partícula de agregado es una de las más trascendentales propiedades del agregado por su influencia en las otras propiedades de éste, puede influir en la estabilidad química, resistencia a la abrasión, resistencias mecánicas, propiedades elásticas, gravedad específica, absorción y permeabilidad.

### **c. Peso Unitario**

Es el resultado de dividir el peso de las partículas entre el volumen total incluyendo los vacíos. Al incluir los espacios entre partículas influye la forma de acomodo de éstos.

### **d. Porcentaje de Vacíos**

Es la medida de volumen expresado en porcentaje de los espacios entre las partículas de agregados, depende del acomodo de las partículas por lo que su valor es relativo como en el caso del peso unitario. Se evalúa usando la siguiente expresión recomendada por ASTM C 29.

$$\% \text{ vacios} = \frac{(S * W - PUC)}{S * W} * 100 \quad (2.1.)$$

#### **Donde:**

S = Peso específico de masa

W = Densidad del agua

P.U.C. = Peso Unitario Compactado seco del agregado

### **e. Humedad**

Es la cantidad de agua superficial retenida por la partícula, su influencia está en la mayor o menor cantidad de agua necesaria en la mezcla se expresa de la siguiente forma

$$\% \text{ humedad} = \frac{(\text{Peso natural} - \text{Peso seco})}{\text{Peso seco}} * 100 \quad (2.2.)$$

#### **2.2.1.2.2. Propiedades resistentes.**

##### **a. Resistencia**

La resistencia del hormigón no puede ser mayor que el de los agregados; la textura la estructura y composición de las partículas del agregado influyen sobre la resistencia. Si los granos de los agregados no están bien cementados unos a otros consecuentemente serán débiles. La resistencia al chancado o compresión del agregado deberá ser tal que permita la resistencia total de la matriz cementante.

##### **b. Tenacidad**

Esta característica está asociada con la resistencia al impacto del material. Está directamente relacionada con la flexión, angularidad y textura del material.

##### **c. Dureza**

Se define como dureza de un agregado a su resistencia a la erosión abrasión o en general al desgaste. La consistencia de las partículas depende de sus constituyentes.

Entre las rocas a emplear en hormigones éstas deben ser resistentes a procesos de abrasión o erosión y pueden ser el cuarzo, la cuarzita, las rocas densas de origen volcánico y las rocas silicosas.

##### **d. Módulo de elasticidad**

Es definido como el cambio de esfuerzos con respecto a la deformación elástica, considerándosele como una medida de la resistencia del material a las deformaciones.

El módulo elástico se delimita en muy inusual su determinación en los agregados sin embargo el hormigón experimentara deformaciones por lo que es razonable intuir que los agregados también deben tener elasticidades acordes al tipo de concreto. El valor del módulo de elasticidad además influye en el escurrimiento plástico y las contracciones que puedan presentarse.

<b>VALORES DE MÓDULOS ELÁSTICOS</b>	
<b>TIPO DE AGREGADO</b>	<b>MÓDULO ELÁSTICO</b>
Granitos	610000 kg/cm <sup>2</sup>
Areniscas	310000 kg/cm <sup>2</sup>
Calizas	280000 kg/cm <sup>2</sup>
Diabasas	860000 kg/cm <sup>2</sup>
Gabro	860000 kg/cm <sup>2</sup>

*TABLA 2.3: Valores de Modulo de Elasticidad.*

*FUENTE:* <http://www.monografias.com/trabajos55/agregados/agregados2.shtml#ixzz2f7G62uJ2>

### **2.2.1.2.3. Propiedades térmicas.**

#### **a. Coeficiente de expansión**

Cuantifica la capacidad de aumento de dimensiones de los agregados en función de la temperatura, depende mucho de la composición y estructura interna de las rocas y varía significativamente entre los diversos tipos de roca.

En los agregados secos es alrededor de un 10% mayor que en estado parcialmente saturado. Los valores oscilan normalmente entre  $0.9 \times 10^{-0,6}$  a  $8.9 \times 10^{-0,6} / ^\circ\text{C}$ .

#### **b. Calor específico**

Es la cantidad de calor necesaria para incrementar en un grado centígrado la temperatura. No varía mucho en los diversos tipos de roca salvo en el caso de agregados muy ligeros y porosos.

### **c. Conductividad térmica**

Es la mayor o menor facilidad para conducir el calor. Está influenciada básicamente por la porosidad siendo su rango de variación relativamente estrecho. Los valores usuales en los agregados son de 1.1 a 2.7 BTU/ pie.hr.°F

### **d. Difusividad**

Representa la velocidad con que se pueden generar cambios térmicos dentro de una masa. Se expresa como el cociente de dividir la conductividad entre el producto de calor específico por la densidad (Cottier, 2006).

## **2.2.2. Pasta de Cemento.**

### **2.2.2.1. Cemento.**

Se denomina cemento a la sustancia aglomerante que combinado con agregados forma la pasta de hormigón o morteros. A continuación, se procede a indicar los cementos más comunes y usados en la región.

#### **a. Cemento hidráulico**

Cemento que fragua y endurece por la interacción química con el agua, tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables.

#### **b. Cemento Portland**

Un cemento hidráulico producido por la pulverización del Clinker Pórtlad, usualmente en combinación con sulfato de calcio.

### 2.2.2.1.1. Tipos de cemento (según la NB 011).

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos. La norma boliviana (NB-011) clasifica los tipos de cemento según un código compuesto de dos partes. Las dos primeras letras clasifican al cemento según los materiales usados para su fabricación como se ve a continuación:

TIPO DE CEMENTO			PROPORCIÓN EN MASA, EN %			
Denominación	Diseño	Tipo	Componentes principales			Componentes adicionales
			Clinker	Puzolana	Filler	
Cemento Portland	Portland	I	95 a 100			0 a 5
	Portland con puzolana	IP	60 a 94	6 a 40		0 a 5
	Portland con filler calizo	IF	65 a 94		6 a 35	0 a 5
Cemento puzolánico		P	45 a 60	40 a 55		0 a 5

TABLA 2.4: Tipo de Cemento  
FUENTE: Norma boliviana NB-011

El número que se ve a continuación del código representa el valor de resistencia a compresión mínima para un ensayo normalizado (NB-470). EL CEMENTO IP-30, que es el más comercial en nuestro medio representa un cemento Portland Tipo Puzolánico con una resistencia a compresión de 30 MPa a los 28 días de edad.

Es importante resaltar que la norma boliviana cumple la clasificación de resistencia a compresión de la norma ASTM (Norteamérica) y no se debe confundir con la norma UNE (Europa) que utiliza una escala diferente. El Cemento IP-30 es equivalente al

CEM II-B de 42,5 MPa de resistencia en Europa. La diferencia en la resistencia se debe al tipo de ensayo y preparación de las muestras, sin embargo, es importante aclarar que el cemento sigue siendo el mismo.

El componente básico del cemento es el clinker y es la mezcla de cuatro componentes principales como se observa en Tabla 2.5. De todos los componentes, entre el 60% al 80% son silicatos. Éstos no se encuentran en estado puro en el clinker sino conteniendo pequeñas cantidades de alúmina, magnesia y otros óxidos.

Componente	Composición por óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrato cálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

TABLA 2.5: Principales componentes del Cemento Portland.  
FUENTE: "Tecnología del concreto" NEVILLE-BROOKS

Desde el punto de vista químico todo cemento trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, adquiridos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Alcanzando así su resistencia característica.

En Bolivia sólo se fabrican los cementos del Tipo I, y IP. El TIPO I es un cemento común, para usos generales, es el que más se emplea para fines estructurales cuando no se requieren de las propiedades especiales especificadas para los otros cuatro tipos de cemento (IBNORCA, 2010).

En las siguientes tablas se muestran diferentes particularidades para los cementos Tipos I.

ESPECIFICACIONES	NORMA BOLIVIANA NB 011	NORMA ESPAÑOLA UNE 80-301

Tipo	I	I
Categoría resistente	40	45
Composición		
clinker %	95-100	95-99
componentes adicionales %	0 a 5	1 a 5
Requerimientos Químicos		
Perdidas por calcinación, % Max.	5	5
Residuo insoluble, % Max.	3	5
Trióxido de azufre, % Max.	3,5	4,5
Oxido de magnesio, % Max.	6	-
Requerimientos físicos		
Resistencia a la compresión, Mpa		
Mínima a los: 3 días	17	-
7 días	25	30
28 días	40	45
Fraguado Vicat		
Mínimo inicial, Minutos	45	60
Máximo final, Horas	10	12
Superficie específica mínima, cm <sup>2</sup> /g	2600	-
Expansión		
Autoclave, % máximo	8	-
Le Chatelier, mm máx.	10	10

*TABLA 2.6: Comparación de Normas Internacionales, para características del Cemento. Portland Tipo 140*

*FUENTE: Norma Boliviana 011*

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (NB 061)	TIPO DE CEMENTO			
	I	IP	IF	P
Pérdida por calcinación (% máx.)	5	7	7	8
Residuo insoluble (% máx.)	3	-	5	-
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (% máx.)	3,5	4	4	4
Oxido de magnesio (MgO) (% máx.)	6	6	6	6
Puzolanicidad 8 o 15 días	-	-	-	> 0

*TABLA 2.7: Especificaciones Técnicas para los Cementos  
FUENTE: Norma Boliviana 011*

#### **2.2.2.2. Agua.**

El agua tiene una relación estrecha con el hormigón en varios aspectos. Por un lado es, junto con el cemento, uno de los componentes de la pasta cementicia, la que a su vez, por su efecto aglomerante es la responsable de las propiedades finales de la mezcla.

Si bien es imprescindible la presencia del agua para producir la reacción química del cemento, su exceso durante el proceso de fraguado es perjudicial para la resistencia final del hormigón. Cuanta menos agua se incorpora a la mezcla, más resistencia y más impermeabilidad se obtendrá y por lo tanto el hormigón será de más durabilidad. Pero al mismo tiempo, cuanta menos agua se utiliza, menos trabajabilidad tendrá la mezcla, dificultando el proceso de llenado de los encofrados. En cambio, durante el endurecimiento del hormigón, es necesario mantener la presencia de agua para que se siga produciendo la reacción química (Zabaleta, 1988).

Este procedimiento se denomina "curado" del hormigón y debe prolongarse el mayor tiempo posible a fin de incrementar la resistencia y durabilidad.

Si las aguas de mezclado contienen compuestos solubles o expansivos, pueden destruir el hormigón. El agua también es nociva en los procesos de congelación por bajas

temperaturas, ya que el aumento de volumen resultante puede originarse en la destrucción del hormigón.

Las condiciones que debe reunir el agua de mezclado son el ser químicamente pura, potable, no contener azúcares, aceites ni sales. De no tenerse la seguridad de la potabilidad del agua, debe practicarse un ensayo, comparando el tiempo de fraguado de la mezcla con el tiempo de fraguado con mezcla con agua potable, verificando las diferencias que resulten entre el inicio del proceso de fragüe (dos horas, aproximadamente) y su terminación (alrededor de las siete horas).

También puede compararse la resistencia final mediante el empleo de probetas materializadas con mezcla con el agua a utilizar y otras realizadas con aguas conocidas y su posterior ensayo. Una diferencia en más o en menos del diez por ciento resulta aceptable.

Por otro lado, el agua puede ponerse en contacto con los hormigones endurecidos en diferentes etapas de la vida de éstos. Este contacto es perjudicial para el buen comportamiento de las estructuras (Castiarena, 1944).

### **2.2.2.3. Hidratación del cemento.**

La hidratación es la relación química que se presenta entre el agua y estos cuatro componentes principales del cemento Portland (Silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico, aluminoferrato cálcico). El gel del cemento endurecido es el resultado de la hidratación. Éste es el componente que une los constituyentes del hormigón, permitiéndole que trabaje como una entidad estructural. Aunque el componente se encuentra en mayor cantidad es el agregado, alrededor del 70%, la pasta del cemento es la que envuelve a los agregados. Es por esto que la pasta es determinante en las propiedades físicas y de los mecanismos de transporte en el hormigón (Neville, 1999).

#### **2.2.2.3.1. Niveles de la hidratación del cemento.**

La reacción de hidratación es bastante compleja, debido a que el grano de cemento individual varía en tamaño y composición. Como consecuencia el resultado del producto de hidratación tampoco es uniforme y las características microestructurales,

también difieren en el tiempo y su coloración. Por esto se describe la hidratación de la microestructura del cemento por niveles que ya mencionamos.

**a. Nivel I: Matriz C-S-H-C:**

El nivel I del cementicio, según la microestructura de niveles presentada anteriormente, se refiere a la matriz del gel C-S-H (silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita) y la porosidad intrínseca de este. El gel C-S-H es la fase microestructural más pequeña ( $10^{-9}$  m a  $10^{-7}$  m) y se supone el 50% al 60% del volumen total de sólidos en la pasta completamente hidratada y es, por tanto, el producto de hidratación más importante a la hora de determinar las propiedades como la resistencia y la durabilidad.

El gel de C-S-H es una mezcla de partículas laminares, como variada morfología y composición química, rodeada de un sistema de poros más o menos continuo que pueden o no estar parcial o totalmente llenos de agua (Neville, 1999).

**b. Nivel II: Pasta de cemento:**

Las fases que forma el nivel II son, junto con la matriz homogénea de C-S-H, la portlandita (CH), los aluminatos, el clinker, no hidratado y la porosidad no capilar.

El hidróxido de calcio o portlandita (CH) constituye del 20-25% del volumen de sólidos en la pasta hidratada. Como la estequiometría de la portlandita está bien definida, caso opuesto al del gel C-S-H, forma cristales hexagonales, y el tamaño de los mismos es varios cientos de micras cuando no les está impedido el crecimiento dentro de los espacios vacíos, que es lo usual.

Los sulfoaluminatos cálcicos ocupan del 15 al 20% del volumen de sólidos en la pasta de cemento hidratada y por tanto no son relevante en la relación microestructura-propiedades.

Es conocida con el nombre de etringita y forma cristales finos y alargados con longitudes del orden de micrómetros.

Dependiente del grado de hidratación y de la distribución del tamaño de las partículas del cemento, se puede encontrar granos de clinker no hidratado en la microestructura

pasta, aun mucho tiempo más después de la hidratación término. Esto es debido al tamaño de rango de tamaños de clinker (entre 1 a 50  $\mu\text{m}$ ) (Neville, 1999).

### **c. Nivel III: Hormigón**

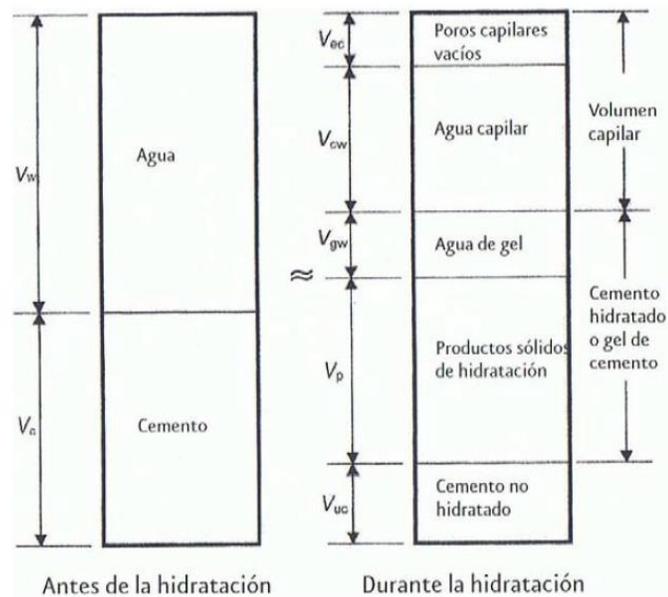
La diferencia entre la pasta de cemento (Nivel II) y el hormigón desde el punto de vista composicional es, la presencia de agregados.

Al aparecer el agregado presenta una característica en el material, la zona de interface entre la pasta de cemento y el agregado. La microestructura de pasta de cemento que se encuentra cerca del agregado es distinta a la que se encuentra lejos de esta interfaz, llamada normalmente zona de transición.

El volumen de pasta de contacto con los agregados, incluido de arena, es importante; así, las propiedades y características de esta zona de transición influencia en buena medida las propiedades tecnológicas del concreto como las mecánicas (resistencia, rigidez) y las de transporte (permeabilidad, difusión y absorción capilar).

Se pudo observar en un esquema de la zona de transición; el espesor está entre 20-40 $\mu\text{m}$  y puede llegar a un máximo de 50  $\mu\text{m}$ .

Normalmente en el hormigón, las partículas de agregado tienen un espaciamiento de 75 a 100  $\mu\text{m}$ . Asumiendo 40-  $\mu\text{m}$  de espesor para la zona de transición, se ha estimado que la ITZ hace un 20-40% del total del volumen de la matriz cementicia. Un valor bastante alto de pasta de cemento (Neville, 1999).



*FIGURA 2.1: Representación volumétrica de la pasta de Cemento antes y después de la Hidratación*

*FUENTE: "Concrete" MINDESS-YOUNG*

### **2.3. Microestructura del hormigón.**

El estudio de la microestructura del hormigón tiene gran importancia para el conocimiento del comportamiento de sus propiedades y características del hormigón. Es la estructura material en estado sólido generada por el fraguado del cemento y cuyos tamaños son inferiores a 0,20 mm. Por lo que la microestructura es la fase sólida, en la que el hormigón ha logrado un desarrollo mecánico debido al estado avanzado de las reacciones químicas del cemento con el agua.

Las características de la microestructura del hormigón están relacionadas con la porosidad de la pasta de cemento endurecida, la conexión entre los poros, la distribución de sus tamaños, capacidad para el transporte del agua, relaciones y equilibrios entre los diferentes productos de la hidratación, la naturaleza de la interface entre la pasta hidratada y el agregado, así como otros factores.

La caracterización completa de la microestructura del hormigón sólido lleva consigo la determinación de los tipos, cantidades y distribución de todos los constituyentes presentes.

### **2.3.1. Microestructura de niveles en el hormigón.**

El tratamiento científico del hormigón entraña grandes dificultades, que son función de la heterogeneidad y complejidad de los materiales cementicios, resulta obvio que para entender y controlar las propiedades del hormigón se debe profundizar en el estudio de su estructura y distribución de sus fases, (Constantinides, Heukamp, 2005), consideraron al concreto dividido en 4 distintos niveles.

(Monserrat, 2007) hizo una modificación a la división de escala propuesta por Constantinides para la caracterización, que abarca un rango desde los nanómetros a los centímetros, esta modificación debida a la consideración de los poros como una fase más en la escala de longitudes. Esta división tiene cuatro niveles fundamentales.

#### **a. Nivel I:**

En este nivel se estudia el nivel la presencia de gel C-S-H en una escala para  $10^{-6}$  –  $10^{-8}$  m. Puede considerarse el nivel más bajo accesible mediante ensayos mecánicos como la microscopia electrónica del barrido. En este nivel aparecen los microscopios o poros de gel con un tamaño inferior a 2nm., los cuales están asociados con la estructura de capas del gel C-S-H (Silicato de Calcio Hidratado).

#### **b. Nivel II:**

En este nivel encontramos la matriz de gel C-S-H junto con los granos de cemento sin hidratar (Clinker), los cristales de portlandita (CH o hidróxido de calcio) de gran tamaño y de los poros capilares, con un tamaño del orden de las micras ( $10^{-3}$  -  $10^{-2}$ m), el cual corresponde a la pasta de cemento.

#### **c. Nivel III:**

Se refiere al mortero ( $10^{-3}$ - $10^{-1}$ m), trifásico como en el interior, compuesto por matriz de pasta de cemento, inclusiones de arena y macroporos. Además, aparece una zona de transición entre los agregados de arena y la pasta de cemento.

#### **d. Nivel IV:**

Se considera al hormigón como un material homogéneo ( $10^{-1}$ - $10^1$ m), trifásico, es decir, compuesto por agregados embebidos en una pasta de cemento con una zona de transición.

#### **2.4. Estados del hormigón.**

El hormigón es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une los agregados, la mezcla inicialmente de consistencia pastosa, se rigidiza paulatinamente hasta alcanzar un grado de dureza similar al de una piedra natural, debido a la reacción química que se produce entre el cemento y el agua de amasado, a consecuencia de este proceso se presentan tres estados fresco, fraguado y endurecido.

La combinación del cemento con el agua se la denomina Zona Interfacial de Transición: siendo la matriz de cemento hidratada que se halla en las zonas superficiales de los áridos y que abarca entre 50 y 100  $\mu$ m desde la superficie del árido. Es una fase que condiciona un alto número de propiedades de estos materiales (durabilidad, resistencia) (Guillermo Guerrero Villalobos, 1994).

##### **2.4.1. Estado fresco.**

Al principio el hormigón parece una “masa”. Es blando y puede ser trabajado o moldeado en diferentes formas. Y así se conserva durante la colocación y la compactación. Las propiedades más importantes del concreto fresco son la trabajabilidad, segregación, exudación, contracción.

###### **2.4.1.1. Propiedades y características.**

###### **2.4.1.1.1. Trabajabilidad**

Está definida por la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del hormigón. Su evaluación es relativa, por cuanto depende realmente

de las facilidades manuales o mecánicas de que se disponga durante las etapas del proceso, ya que un hormigón que puede ser trabajable bajo ciertas condiciones de colocación y compactación, no necesariamente resulta tal si dichas condiciones cambian.

Está influenciada principalmente por la pasta, el contenido de agua y el equilibrio adecuado entre gruesos y finos, que produce en el caso óptimo una suerte de continuidad en el desplazamiento natural y/o inducido de la masa, sin que segregue ni exude excesivamente.

Por lo general un hormigón es trabajable en la mayoría de circunstancias, cuando durante su desplazamiento mantiene siempre una película de mortero de al menos  $\frac{1}{4}$ " sobre el agregado grueso.

El método tradicional de medir la trabajabilidad ha sido desde hace muchos años el "Slump" o asentamiento con el cono de Abrams, ya que permite una aproximación numérica a esta propiedad del hormigón, sin embargo, debe tenerse clara la idea que es más una prueba de uniformidad que de trabajabilidad, pues es fácilmente demostrable que se pueden obtener concretos con igual slump pero trabajabilidades notablemente diferentes para las mismas condiciones de trabajo.

Para lograr una mayor aproximación a la trabajabilidad, la Reología, que es la ciencia que estudia el flujo o desplazamiento de los materiales, ha establecido los siguientes conceptos que permiten enfocar con más precisión el comportamiento reológico del hormigón en estado fresco y por consiguiente su trabajabilidad.

DESCRIPCION TRABAJABILIDAD	DESLIZAMIENTO (mm)	VEE – BEE TIEMPO (sg)	COMPACTAR FACTOR
Extremadamente seco		32 - 18	
Muy rígido		18 - 10	0,70
Rigidez	0 - 25	10 - 5	0,75
Plástico rígido	25 - 50	5 - 3	0,85
Plástico	75 - 100	3 - 0	0,90
Fluyendo	150 - 175		0,95

TABLA 2.8: Comparación de diferentes Métodos de Consistencia.

FUENTE: [http://www.theconcreteportal.com/conc\\_funda.html](http://www.theconcreteportal.com/conc_funda.html)

### a. Estabilidad

Es el desplazamiento o flujo que se produce en el hormigón sin mediar la aplicación de fuerzas externas.

Se cuantifica por medio de la exudación y la segregación, evaluada con métodos standard que permiten comparar dichas características entre varios diseños, siendo obvio que se debe buscar obtener los valores mínimos.

Es interesante notar que ambos fenómenos no dependen expresamente del exceso de agua en la mezcla sino del contenido de finos y de las propiedades adherentes de la pasta.

### b. Compactabilidad

Es la medida de la facilidad con que puede compactarse el hormigón fresco. Existen varios métodos que establecen el denominado “Factor de compactación”, que evalúa la cantidad de trabajo que se necesita para la compactación total, y que consiste en el cociente entre la densidad suelta del concreto en la prueba, dividido entre la densidad del hormigón compactado.

### c. Movilidad

Es la facilidad del hormigón a ser desplazado mediante la aplicación de trabajo externo. Se evalúan en función de la viscosidad, cohesión y resistencia interna al corte.

La viscosidad viene dada por la fricción entre las capas de la pasta de cemento, la cohesión es la fuerza de adherencia entre la pasta de cemento y los agregados, y la resistencia interna al corte la provee la habilidad de las partículas de agregados a rotar y desplazarse dentro de la pasta.

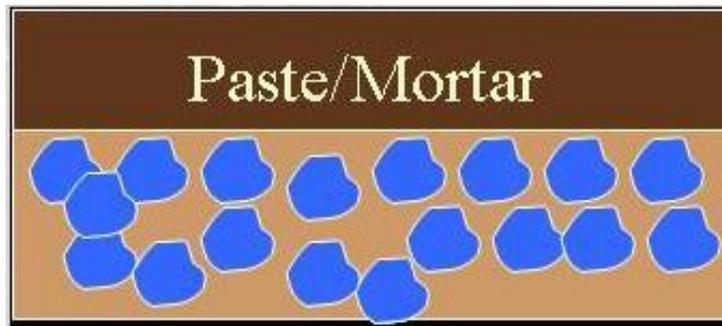
#### **2.4.1.1.2. Segregación**

Las diferencias de densidades entre los componentes del hormigón provocan una tendencia natural a que las partículas más pesadas descendan, pero en general, la densidad de la pasta con los agregados finos es sólo un 20% menor que la de los gruesos (para agregados normales) lo cual sumado a su viscosidad produce que el agregado grueso quede suspendido e inmerso en la matriz.

Cuando la viscosidad del mortero se reduce por insuficiente concentración la pasta, mala distribución de las partículas o granulometría deficiente, las partículas gruesas se separan del mortero y se produce lo que se conoce como segregación.

La segregación es la separación de la mezcla de hormigón como resultado de las diferencias en los tamaños y pesos específicos de los constituyentes de la mezcla. Típicamente, los agregados gruesos tienden a sedimentarse de la masa del hormigón. La segregación puede controlarse mediante la elección de la clasificación adecuada y por cuidado en la manipulación durante la colocación y consolidación.

La lechada es la escoria de la pasta de cemento fresco que se forma en la superficie del hormigón segregado. Una superficie débil y polvoriento se crea tras el endurecimiento del hormigón, y la superficie también es susceptible al agrietamiento. La lechada es diferente del agua de purga.



*FIGURA 2.3: Componentes del hormigón en porcentaje*  
*FUENTE: [http://www.theconcreteportal.com/conc\\_funda.html](http://www.theconcreteportal.com/conc_funda.html)*

#### **2.4.1.1.3. Exudación.**

Propiedad por la cual una parte del agua de mezcla se separa de la masa y sube hacia la superficie del hormigón.

Es un caso típico de sedimentación en que los sólidos se asientan dentro de la masa plástica. El fenómeno está gobernado por las leyes físicas del flujo de un líquido en un sistema capilar, antes que el efecto de la viscosidad y la diferencia de densidades.

Está influenciada por la cantidad de finos en los agregados y la finura del cemento, por lo que cuanto más fina es la molienda de éste y mayor es el porcentaje de material menor que la malla N° 100, la exudación será menor pues se retiene el agua de mezcla. La exudación se produce inevitablemente en el hormigón, pues es una propiedad inherente a su estructura, luego lo importante es evaluarla y controlarla en cuanto a los efectos negativos que pudiera tener.

No debe caerse en el error de considerar que la exudación es una condición anormal del hormigón, ni en la práctica usual de “secar” el hormigón espolvoreando cemento en la superficie ya que si esto se ejecuta mientras aún hay exudación, se crea una capa superficial muy delgada de pasta que en la parte inferior tiene una interface de agua que la aísla de la masa original. En estas condiciones, al producirse la contracción por secado o cambios volumétricos por temperatura esta película delgada de pasta se agrieta, produciéndose el patrón de fisuración tipo panal de abeja, que los norteamericanos denominan “crazing”.

Si se espolvorea cemento cuando la exudación ha terminado, integrado la pasta con la mezcla original se logra reducir la relación Agua/Cemento en la superficie con resultados positivos en cuanto a durabilidad al desgaste.

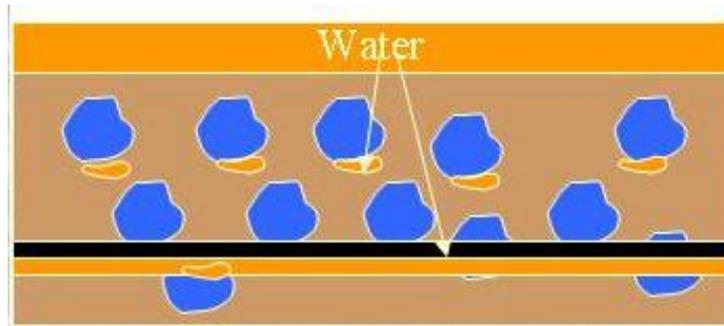


Figura 2.4: El sangrado hace que el agua se acumule en la superficie, así como quedarse atrapado bajo los agregados y productos corrugados

FUENTE: [http://www.theconcreteportal.com/conc\\_funda.html](http://www.theconcreteportal.com/conc_funda.html)

#### 2.4.1.1.4. Contracción.

Es una de las propiedades más importantes en función de los problemas de fisuración que acarrea con frecuencia.

Ya hemos visto que la pasta de cemento necesariamente se contrae debido a la reducción del volumen original de agua por combinación química, y a esto se le llama contracción intrínseca que es un proceso irreversible.

Pero además existe otro tipo de contracción inherente también a la pasta de cemento y es la llamada contracción por secado, que es la responsable de la parte de los problemas de fisuración, dado que ocurre tanto en el estado plástico como en el endurecido si se permite la pérdida de agua en la mezcla.

Este proceso no es irreversible, ya que, si se repone el agua perdida por secado, se recupera gran parte de la contracción acaecida.

Esta propiedad se tratará con mucha amplitud al tocar el tema de los cambios volumétricos en el hormigón, el tener claro que el hormigón de todas maneras se contrae y si no tomamos las medidas adecuadas indefectiblemente se fisura, y en muchos casos esta fisuración es inevitable por lo que sólo resta prevenirla y orientarla.

### **2.4.2. Estado fraguado.**

Es un periodo durante el cual el proceso de hidratación que comienza no bien se pone en contacto el agua con el cemento, se hace evidente al ir perdiendo la mezcla gradualmente su capacidad de cambiar de forma, manteniendo su homogeneidad. Todavía no tiene resistencia mecánica pero ya no permite su transporte sin que se deterioren sus propiedades finales. Finalmente, después de un periodo de varias horas (4 a 10), cuya duración depende de varios factores, entre los cuales están las características del cemento empleado y la temperatura y humedad ambiente, termina el fraguado a partir del momento en que la masa llega a adquirir resistencia mecánica, es decir que ofrece resistencia a la rotura en ensayos mecánicos, este proceso se da cuando ya no está blando después de la compactación y durante el acabado (Castiarena, 1994).

### **2.4.3. Estado endurecido.**

Después de que el hormigón ha fraguado empieza a ganar resistencia y se endurece. Las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los materiales que lo componen y de las condiciones ambientales a que está expuesto sus propiedades son; elasticidad, resistencia, extensibilidad y durabilidad (Castiarena, 1994).

#### **2.4.3.1. Propiedades y características.**

##### **2.4.3.1.1. Densidad.**

La densidad de hormigón se define como el peso por unidad de volumen. Variará con la clase de áridos y con la forma de colocación en obra.

Depende de la densidad real y de la proporción en que participan cada uno de los diferentes materiales que son constituyentes del hormigón. Para los hormigones convencionales, formados por materiales granulares provenientes de rocas no mineralizadas de la corteza terrestre su valor oscila entre  $2350 \text{ kg/m}^3$  y  $2550 \text{ kg/m}^3$ .

La densidad normalmente experimenta ligeras variaciones con el tiempo, las que provienen de la evaporación del agua de amasado hacia la atmósfera y que puede significar una variación de hasta un 7% de su densidad inicial.

Ésta puede ser variada artificialmente, ya sea por debajo o sobre los valores mencionados, constituyendo en este caso los denominados hormigones livianos o pesados, respectivamente.

#### **a. Hormigones livianos:**

Se obtienen por medio de la incorporación de aire, ya sea directamente en la masa de hormigón o incorporada en los áridos utilizando áridos livianos. Se utiliza principalmente cuando se desea obtener aislación térmica y acústica mayores a la del hormigón convencional.

La densidad de los Hormigones Ordinarios:

Apisonados: 2000 a 2200 kg/m<sup>3</sup>

Vibrados: 2300 a 2400 kg/m<sup>3</sup>

Centrifugados: 2400 a 2500 kg/m<sup>3</sup>

Proyectados 2500 a 2600 kg/m<sup>3</sup>

#### **b. Hormigones pesados:**

Se obtienen mediante el uso de áridos mineralizados, cuya densidad real es mayor que la de los áridos normales, se utiliza principalmente cuando se desea obtener aislación contra partículas radiactivas. los 4000 kg/m<sup>3</sup>.

#### **2.4.3.1.2. Resistencia**

La resistencia es una de las propiedades más importantes del hormigón principalmente cuando se le utiliza con fines estructurales.

El hormigón en su calidad de constituyente de un elemento estructural, queda sometido a las tensiones derivadas de las solicitaciones que actúan sobre éste. Si sobrepasan su capacidad resistente se producirán fracturas, primero de origen local y posteriormente generalizadas, que podrán afectar la seguridad de la estructura.

Por este motivo, los elementos estructurales deben ser dimensionados de manera que las tensiones producidas no sobrepasen la capacidad resistente del material constituyente, lo cual muestra la importancia de conocer esas características.

Dentro de la resistencia del hormigón podemos encontrar dos tipos:

#### **a. Resistencia a Compresión Simple**

Característica mecánica más importante de un hormigón, su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas empleadas para determinar la resistencia a la compresión, son de forma cubica o cilíndrica. De las primeras, se emplean de preferencia las de 15 y 20 cm de arista, y para las segundas, las de 15cm de diámetro y 30 cm de altura.

- Velocidad de aplicación de la carga de ensayo
- Estado de las superficies de aplicación de la carga de ensayo
- Centrado de la carga de ensayo

Las características del hormigón también condicionan de manera importante su resistencia a la compresión.

#### **b. Resistencia a Tracción**

La resistencia a la tracción del hormigón ha sido menos estudiada que la resistencia a la compresión, en parte debido a la mayor incertidumbre que existe para su determinación.

Existen 3 formas distintas de ejecución de los ensayos: por tracción directa, por flexión y por tracción indirecta, cada uno de las cuales conduce a valores sensiblemente diferentes.

##### ➤ **Ensayo de Tracción Directa:**

Consiste en la aplicación de dos cargas opuestas colineales con el eje de la probeta que se ensaya. El ensayo se efectúa adhiriendo una probeta prismática a las placas de la prensa que aplica las cargas de tracción.

➤ **Ensayo de Tracción por Flexión**

Consiste en someter a una vigueta de hormigón a un ensayo de flexión mediante una o dos cargas concentradas.

➤ **Ensayo de Tracción Indirecta o hendimiento:**

Consiste en someter aun probeta cilíndrica o cubica a una carga lineal concentrada según dos ejes longitudinales opuestos. Al aumentar las cargas, la rotura se produce por tracción según el plano formado por los ejes de carga.

**2.4.3.1.3. Resistencia Térmica.**

Es la capacidad de soportar diferencias térmicas notables.

- a. Bajas temperaturas. Hielo/deshielo
- b. Altas temperaturas. Mayores de 50°C o más (según el tipo de hormigón).

**2.4.3.1.4. Variaciones de Volumen de Hormigón.**

El hormigón experimenta variaciones de volúmenes, dilataciones o contracciones, durante toda su vida útil por causas físico - químicas.

La variación de volumen deriva de las condiciones de humedad y se denomina retracción hidráulica, y las que tienen por causa la temperatura, retracción química. Por su parte, de las originadas por la composición atmosférica, la más frecuente es producida por el anhídrido carbónico, y se denomina carbonatación.

**a. Retracción Hidráulica**

La retracción hidráulica del hormigón se origina por dos causas principales:

Endógenas al hormigón, que derivan de variaciones de volumen producidas en la pasta del cemento durante el proceso de fraguado y endurecimiento. Esta variación consiste

en una contracción, pues el volumen absoluto de los compuestos hidratados es menor que el de los compuestos originales del cemento.

#### **b. Retracción Térmica**

El hormigón experimenta variaciones de volumen causadas por la temperatura, las cuales pueden provenir tanto externamente de la temperatura ambiente como internamente de las generadas durante el fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento, proceso exotérmico.

#### **c. Retracción por Carbonatación**

El proceso de hidratación de la pasta de cemento deja una cierta proporción de cal libre, es decir, sin participar en el proceso químico de fraguado. Esta cal libre es susceptible de combinarse con anhídrido carbónico del aire, produciendo carbonato de calcio, combinación química que tiene un carácter contractivo, por lo cual el espesor de hormigón disminuye su volumen inicial, generándose la denominada retracción por carbonatación.

#### **2.4.3.1.5. Elasticidad y Plasticidad.**

El conocimiento de las propiedades elásticas del hormigón es necesario para poder establecer la relación entre tensiones y deformaciones, aspecto que adquiere gran importancia en algunos problemas de tipo estructural.

Las propiedades plásticas son necesarias para evaluar el comportamiento a largo plazo en elementos sometidos a tensión permanente.

#### **a. Propiedades Elásticas:**

La relación entre tensiones y deformaciones se establece a través del módulo de elasticidad. Para los materiales totalmente elásticos, el módulo de elasticidad es constante e independiente de la tensión aplicada. En otros materiales designados

inelásticos, en cambio, el módulo de elasticidad depende del valor del esfuerzo aplicado.

## **b. Propiedades Plásticas**

Esta propiedad se presenta cuando una determinada carga permanece aplicada un largo tiempo, produciéndose una deformación denominada fluencia del hormigón. El conocimiento de la fluencia es necesario para el análisis estructural en el caso del cálculo de deformaciones en elementos de hormigón armado.

### **2.4.3.1.6. Permeabilidad**

El hormigón es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exteriormente, se produce escurrimiento a través de su masa. El grado de permeabilidad del hormigón depende de su constitución, y cuenta con un rango de permeabilidad relativamente amplio, por lo cual es conveniente conocer el mecanismo mediante el cual se produce el escurrimiento de agua en el hormigón. El agua puede escurrir en el interior del hormigón a través de dos vías:

- La discontinuidad (poros y fisuras) de la pasta de cemento,

Producida principalmente por la porosidad derivada del agua introducida en el hormigón para otorgarle trabajabilidad necesaria y por las microfisuras producidas por las variaciones de volumen interna por retracción hidráulica y térmica.

- La porosidad

En el análisis de las dos secciones precedentes revela que la resistencia del hormigón es fundamentalmente una función de volumen de vacíos, Existente en el contacto entre la pasta de cemento y los áridos constituyentes del hormigón, que proviene principalmente de su insuficiente relleno de los huecos del esqueleto constituido por los áridos por parte de la pasta de cemento.

#### **2.4.3.1.7. Durabilidad**

Debe mantener sus propiedades inalterables en el tiempo, debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes los cuales estarán sometidos en el ensayo, vale la pena agregar que la durabilidad no significa un tiempo indefinido, ni quiere decir soportar cualquier acción sobre el hormigón.

Durante toda la vida útil, el hormigón está permanentemente expuesto a las acciones provenientes de agentes externos e internos, que pueden afectar su durabilidad si no se les tiene debidamente en cuenta.

Estas acciones pueden ser producidas por agentes físicos o químicos:

##### **a. Acción de los Agentes físicos:**

Los agentes que producen efectos de mayor importancia en el hormigón son los derivados de las variaciones de tipo ambiental y de procesos erosivos.

Los efectos de tipo ambiental, se manifiestan través de variaciones de temperatura y de humedad.

##### **➤ Variación de Temperatura:**

Las variaciones de mayor importancia, por la magnitud de sus efectos, son las derivadas de los ciclos alternativos con temperaturas bajo y sobre 0° C. Dependiendo del rango de variación de estos ciclos, principalmente de las temperaturas de bajo 0°C, y del estado saturado del hormigón, el agua contenida en sus poros puede congelarse, produciéndose un proceso expansivo de gran magnitud que puede causar una desintegración paulatina del hormigón.

##### **➤ Variaciones de Humedad:**

Se manifiestan a través de ciclos alternativos de saturación y secado del hormigón, los cuales por efecto de la tensión superficial del agua contenida en sus poros puede producir un proceso degradante.

##### **➤ Abrasión Mecánica:**

Se produce por el desplazamiento de materiales sólidos sobre la superficie de un elemento de hormigón. Estos materiales pueden ser cuerpos móviles, vehículos o similares.

➤ **Cavitación:**

Consiste en el proceso destructivo que experimentan los materiales sometidos a escurrimiento de agua de alta velocidad si existen irregularidades en la superficie en contacto con el agua que lleguen a inducir un despegue de la napa.

**b. Acciones de los Agentes Químicos**

Las acciones de estos agentes sobre el hormigón pueden ser internamente en el hormigón o bien provenir de acciones agresivas externas.

➤ **Acción de Agentes Internos:**

Esta deriva del aporte de productos que afectan el proceso de fraguado o endurecimiento del cemento, o bien que generan productos expansivos que dañan su estabilidad.

De este tipo de agentes encontramos el aporte de los áridos: materia orgánica y los compuestos que producen la reacción álcali-árido, de naturaleza expansiva.

➤ **Efectos Materia Orgánica:**

La materia orgánica, aportada por los áridos, afecta el proceso de fraguado de la pasta de cemento, principalmente a través del contenido de ácido tánico presente en ella. La magnitud de estos efectos depende, por esta razón, de la cantidad y origen de la materia orgánica presente y su acción se manifiesta en general sobre un retardo del fraguado

➤ **Efecto de los Compuestos Reactivos:**

Los áridos pueden contener componentes combinables con los compuestos producidos durante el fraguado de la pasta cemento, de estos componentes potencialmente más peligrosos aquellos que en su constitución contienen sílice amorfa, tales como ópalo, la calcedonia y los vidrios volcánicos, los sulfatos y sulfuros de calcio y arcillas expansivas, los cuales al reaccionar forman compuestos expansivos, que pueden llegar a desintegrar el hormigón, debiendo eliminar los áridos que posean estas características.

➤ **Acción Agentes Externos:**

Existen números compuestos químicos que son susceptibles de producir ataques de distinta magnitud sobre los elementos de hormigón. Cuando un elemento va a estar en contacto con compuestos de naturaleza agresiva, ya sea en periodos prolongados con

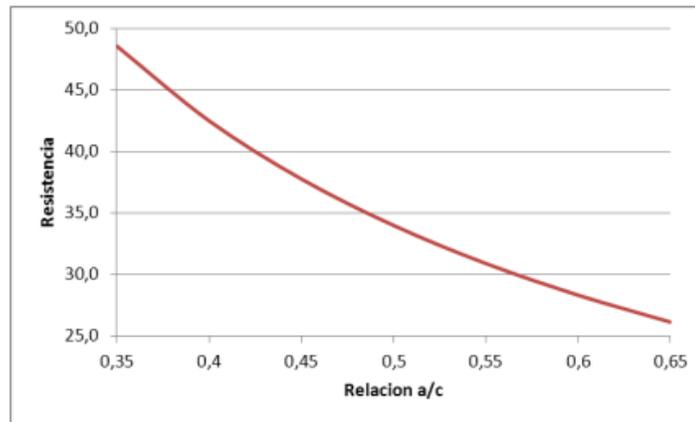
efectos intensos, o como los de efectos moderados, debe preverse una protección de la superficie del elemento de hormigón.

#### **2.4.4. Influencias del contenido de agua en las propiedades del hormigón.**

Dado que las propiedades finales del hormigón endurecido, están directamente vinculadas con el grado de hidratación de los componentes del cemento (si la hidratación es más completa, se forma mayor cantidad de geles de tobermorita, y por lo tanto las fuerzas que adhieren entre sí los agregados incrementan), cuanto más tiempo y en mayor cantidad permanezca el agua en contacto con el hormigón, este alcanzara mayor resistencia mecánica. Sin embargo, pueden darse casos en que el agua que penetra en el interior de las estructuras de hormigón tengan un efecto deletéreo; esto se debe a los productos del hidrolisis entre los componentes del cemento y el agua pueden reaccionar con el agua la vía por la que ingresa son los vasos capilares, La influencia del contenido de agua se puede analizar desde los dos estados principales del hormigón:

En estado fresco el agregado de agua aumentará la fluidez del hormigón.

En estado endurecido es donde tiene sus efectos más negativos: la cantidad de agua para hidratar el cemento es de aproximadamente el 25 % del peso del cemento. Con relaciones a/c tan bajas no se puede lograr un hormigón trabajable, con lo cual se debe agregar mayor cantidad de agua de la necesaria para la hidratación. El agua sobrante tenderá a ser eliminada de la masa del hormigón por evaporación, una parte de los espacios donde se encontraba serán ocupados por los compuestos de hidratación del cemento, mientras que el resto de dichos espacios permanecerán vacíos. Esto genera el aumento de la porosidad del hormigón y, consecuentemente, la disminución de la resistencia (Mattio, 2014).



Grafica 2.2: Resistencia vs. relación a/c

FUENTE: [http://www.theconcreteportal.com/conc\\_funda.html](http://www.theconcreteportal.com/conc_funda.html)

Asimismo, se han establecido relaciones matemáticas entre la resistencia y la relación a/c, por ejemplo:

$$R = \frac{960,417}{23,209^{a/c}} \quad (2.3.)$$

Ecuación que nos expresa la resistencia a la compresión del hormigón en función de la relación agua/cemento para el banco de Ventolera Tarija, (Benitez, 1998).

Por lo tanto, la calidad del hormigón endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento.

## 2.5. Dosificación de mezclas.

Al dosificar un hormigón deben tenerse en cuenta tres factores fundamentales, a partir de los cuales se han de delimitar las cantidades necesarias de agua, cemento y áridos para obtener el hormigón deseado al más bajo costo posible.

- ✓ La resistencia
- ✓ La consistencia
- ✓ El tamaño máximo del arrido

Orden a seguir en la dosificación de un hormigón:

1. Fijar la resistencia característica del hormigón de acuerdo con las condiciones previstas para la ejecución de la obra.
2. Elegir el tipo de cemento, en función de la clase de obra, la agresividad del medio y las condiciones climáticas.
3. Establecer la relación agua/cemento que corresponda a la resistencia media del hormigón, según el tipo de cemento y áridos empleados.
4. Determinar el tamaño máximo del árido, en función de los distintos elementos de la obra.
5. Estudiar la consistencia más conveniente del hormigón, según la forma de compactación en obra y, como consecuencia, fijar la cantidad aproximada de agua y determinar la cantidad de cemento correspondiente.
6. Establecer la proporción en que han de mezclarse los áridos disponibles, para que la curva granulométrica del árido total sea la más conveniente al hormigón en estudio.
7. Calcular las cantidades de agua, cemento y áridos necesarias para obtener un metro cúbico de hormigón.
8. Efectuar unas masas de prueba para comprobar si el hormigón obtenido tiene las características deseadas y, en caso contrario, hacer las correcciones necesarias.
9. Fijar la resistencia característica del hormigón de acuerdo con las condiciones previstas para la ejecución de la obra.
10. Elegir el tipo de cemento, en función de la clase de obra, la agresividad del medio y las condiciones climáticas.
11. Establecer la relación agua/cemento que corresponda a la resistencia media del hormigón, según el tipo de cemento y áridos empleados.
12. Determinar el tamaño máximo del árido, en función de los distintos elementos de la obra.
13. Estudiar la consistencia más conveniente del hormigón, según la forma de compactación en obra y, como consecuencia, fijar la cantidad aproximada de agua y determinar la cantidad de cemento correspondiente.

14. Establecer la proporción en que han de mezclarse los áridos disponibles, para que la curva granulométrica del árido total sea la más conveniente al hormigón en estudio.
15. Calcular las cantidades de agua, cemento y áridos necesarias para obtener un metro cúbico de hormigón.
16. Efectuar unas masas de prueba para comprobar si el hormigón obtenido tiene las características deseadas y, en caso contrario, hacer las correcciones necesarias.

### **2.5.1. Métodos de dosificación.**

Existen varios métodos para la dosificación de hormigones, en este estudio emplearemos el método de la ACI.

#### **a. Conceptos generales**

El comité ACI ha desplegado un procedimiento de diseño de mezclas bastante simple el cual, basándose en algunas tablas elaboradas mediante ensayos de los agregados, nos permiten obtener valores de los diferentes materiales que integran la unidad cubica del concreto.

Es usual que las características de la obra establezcan limitaciones a quien tiene la responsabilidad de diseñar la mezcla. Entre dichas limitaciones pueden estar:

- ✓ Relación agua cemento.
- ✓ Contenido de cemento.
- ✓ Contenido máximo de aire
- ✓ Asentamiento.
- ✓ Tamaño máximo del agregado grueso.
- ✓ Resistencia en compresión mínima.

#### **b. Secuencia de diseño**

- 1) Selección de la resistencia promedio a partir de la resistencia en compresión especificada.

- 2) Selección de tamaño máximo de agregado.
- 3) Selección del asentamiento.
- 4) Selección del volumen de agua de diseño.
- 5) Selección de la relación agua-cemento, por resistencia y durabilidad.
- 6) Determinación del contenido de agregado grueso.
- 7) Determinación de volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso.
- 8) Determinación del volumen absoluto del agregado fino.
- 9) Determinación del peso seco del agregado fino.
- 10) Determinación de los valores de diseño del cemento, agua aire agregados finos y gruesos.
- 11) Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.
- 12) Determinación de la proporción en peso, de diseño y de obra.

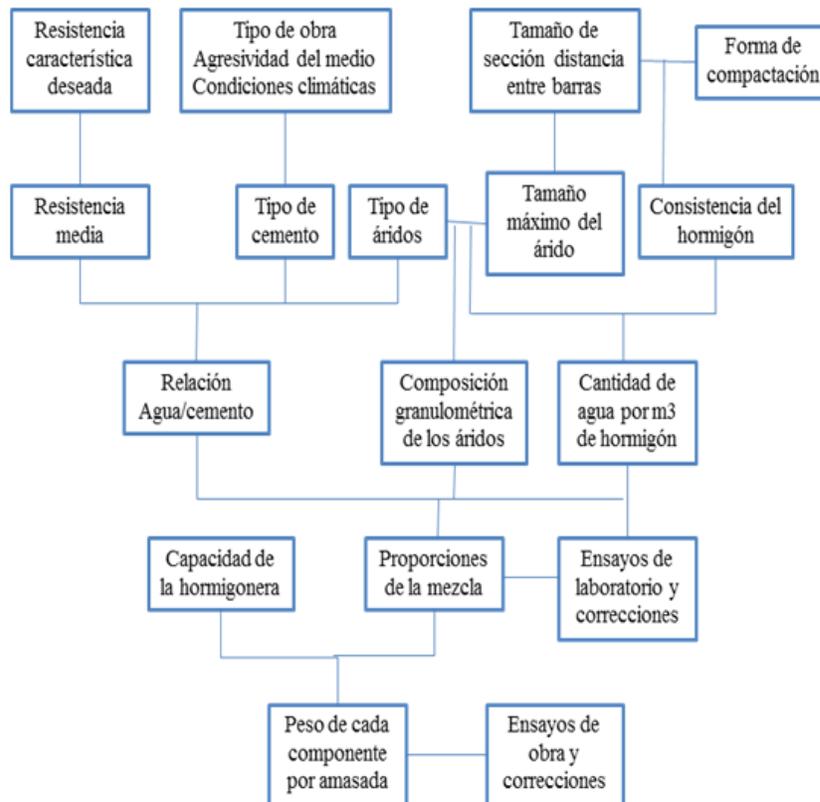


Figura 2.5: Esquema del proceso de dosificación  
Fuente: Jiménez Montoya, García Messeguer, Moran Cabre

## **2.6. Parámetros y propiedades relacionadas del hormigón y la Sorptividad.**

### **2.6.1. Porosidad.**

La porosidad está reconocida en todo el mundo como uno de uno de los parámetros en el hormigón endurecido que ejercen una mayor influencia en los mecanismos de transporte del agua hacia el interior de su estructura, el agua dentro de la estructura de hormigón, más específicamente del estado poroso – capilar dentro del hormigón.

El hormigón se asimila a un material compuesto por dos fases principales: la pasta y los agregados. La pasta está constituida por cientos de millones de agujas y placas que se enreden y entrecruzan entre sí. Esta pasta rodea y cubre los agregados que constituyen así una constelación de incrustaciones duras.

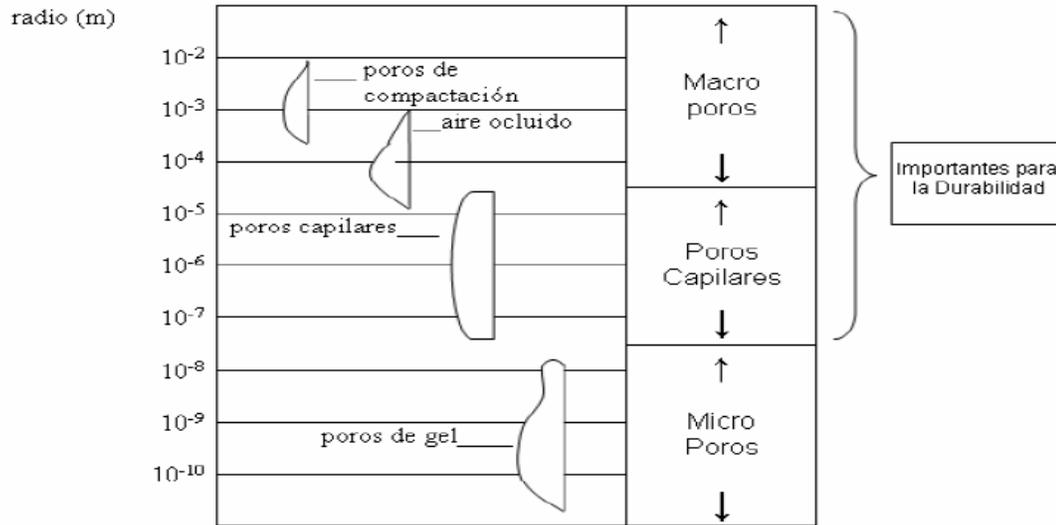
Los vacíos en tal mezcla predominan como es de esperarse en la pasta y de hecho cuando se toma una rebanada de hormigón extremadamente delgada, la luz pasa principalmente a través de dicha pasta. Para entender la penetración de un líquido al interior del hormigón, es necesario comprender cuales son los vacíos presentes en el hormigón (Sika, 2009).

#### **2.6.1.1. Porosidad del hormigón.**

Un medio poroso se compone de una fase sólida y de un espacio poroso o volumen de vacíos. En el hormigón endurecido, constituido por agregados, pasta y aire (naturalmente o intencionalmente incorporado), se debe tener en cuenta los vacíos presentes en los agregados y en la pasta, que representan entre el 8 % y el 25 % del volumen total. Usualmente, el aire incorporado se presenta como poros no conectados, teniendo una escasa influencia en los mecanismos de transporte de fluidos. Las propiedades de transferencia de materia en medios porosos dependen tanto de la distribución de tamaño de poros como de su conectividad.

Los poros presentes en el hormigón tienen distinto origen, poseen los más diversos tamaños y su distribución y conectividad en la mezcla pueden ser muy variables. En la pasta de cemento pueden encontrarse los poros capilares, los generados en la incorporación intencional de aire, los poros del C-S-H, los vacíos producidos durante

las operaciones de mezclado y compactación, y los originados como consecuencia del fenómeno de exudación. Si bien los agregados también presentan poros, su porosidad en general es muy baja comparada con la de la pasta (Mattio, 2014).



**FIGURA 2.6:** Estructura porosa del Hormigón  
**FUENTE:** Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. (2012). Ese material llamado hormigón.

En lo que respecta a los procesos de durabilidad, los poros más críticos son los comprendidos entre  $10^{-2}$  m hasta  $10^{-7}$  m (poros de compactación, aire ocluido y poros capilares). Los micro poros o poros de gel no tienen incidencia en los procesos de durabilidad.

### 2.6.1.2. Porosidad de la pasta.

En la pasta se encuentran los siguientes tipos de poros:

#### 2.6.1.2.1. Poros de Gel C-S-H (espacio entre capas).

Estos vacíos son los que existen dentro de la estructura propia de las “agujas” o “placas” solidas de la pasta cemento hidratado. Estamos así hablando de una distancia que varía entre 5 a 25 Angstroms ( $25 \cdot 10^{-10}$  m). Recordemos que el tamaño de un átomo de Silicio o de Calcio es de  $3 \text{ \AA}$  y  $4 \text{ \AA}$  respectivamente, por lo tanto, los vacíos entre

capas son los espacios que dividen las moléculas de C-S-H, hidratado principal de la pasta hidratada (Mindess, Young, 2005).

Se expone justamente la modelación de una pasta de  $C_3S$ , principal componente del cemento, que se va hidratando. El tamaño de una partícula de  $C_3S$ , (Silicato Tricalcico) en café oscuro de  $80.000 \text{ \AA} - 100.000 \text{ \AA}$  (8 a 10 micras).

Los poros de gel o distancia entre capas de C-S-H como vemos están dentro del color café claro, dentro de la estructura misma de las agujas aquí representadas como café claras. Los poros de gel más grandes tienen un tamaño de hasta 200 Angstroms (20 nm) (Jennings, 2005).

Esta porosidad no es la responsable de la penetración de agua, pero sí de la densidad del hidratado C-S-H. Existe una clasificación que lleva la definición de poros gel hasta una separación máxima de 4nm (400 Angstroms) pero en realidad existe un traslapo con la siguiente escala de vacíos conocida como porosidad capilar.

Los gases pueden sin embargo penetrar con cierta facilidad los poros de gel (de hecho, miden esa porosidad usando gases).

#### **2.6.1.2.2. Poros capilares.**

La porosidad capilar de la pasta depende del agua que excede al agua combinada, teniendo en cuenta que solamente entre 0,23 y 0,25 en peso del cemento es necesario para la hidratación completa del cemento, el resto del agua queda sin combinar, y durante el secado origina la estructura de poros capilares.

Al inicio de la hidratación los poros capilares se conectan tridimensionalmente entre sí, sin embargo, a medida que la hidratación progresa los poros capilares quedan aislados o desconectados. Esta desconexión tiene repercusiones muy importantes sobre los mecanismos de transporte a través de la pasta.

La permeabilidad y la absorción capilar de la pasta de cemento hidratada esta así gobernado en buena parte por los poros capilares a partir de los 10 nm, está directamente relacionada con el volumen, el tamaño y la morfología de los poros capilares.



Nombre	Diametro	Tipo de poro	Tamaño	Nombre	Diametro	Papel de Agua	Propiedades de la pasta afectadas
Microporos	Menor 2 nm	Espacio entre las capas de C-H-S	1nm a 3nm	Microporos intercapas	Hasta 0,5 nm	Agua estructural involucrada en los enlaces no evaporable	Retraccion fluencia de la HR
				Microporos	0,5 nm a 2,5 nm	Agua fuertemente absorbida sin formar meniscos	Retraccion fluencia de la HR
Mesoporos	2nm a 50nm		Capilares pequeños (gel)	10nm a 50nm	Capilares medianos	2,5 nm a 10 nm	Altas fuerzas de tension superficial generadas
		Poros capilares (baja a/c)	10 nm a 50 nm			Moderadas fuerzas de tension superficial generadas	Resistencia permeabilidad retraccion con alta HR > 80%
Macroporos	>50nm	Poros capilares (alta a/c)	3µm a 5µm	Capilares grandes	50 nm a 10 µm	Comportamiento normal de agua en masa	Resistencia permeabilidad
		Aire incorporado	50µm a 1mm	Aire incorporado	0,1 nm a 1 mm		Resistencia

FIGURA 2.8: Expone una síntesis de las clasificaciones de los vacíos de la pasta de cemento y del hormigón.

FUENTE: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. (2012). Ese material llamado hormigón.

## 2.6.2. Mecanismos de Transporte del agua en el hormigón.

La penetración de fluidos como de gases dentro del hormigón determina en buena parte la durabilidad del material. En el caso particular de los líquidos, éstos pueden penetrar la red porosa del hormigón usando principios físicos muy distintos, siendo los fenómenos más frecuentes y de mayor preocupación frente a la contención de líquidos o penetración al interior del material: permeabilidad, difusión y absorción capilar, la convección y electromigración (Sika, 2009).

### 2.6.2.1. Permeabilidad

Se refiere al movimiento de un líquido en presencia de un gradiente de presión como es el que tiene lugar en las estructuras de contención de agua. El hormigón debe estar saturado para poder medir la permeabilidad, la cual se expresa en términos de  $m^3/(m^2s)$  es decir en m/s.

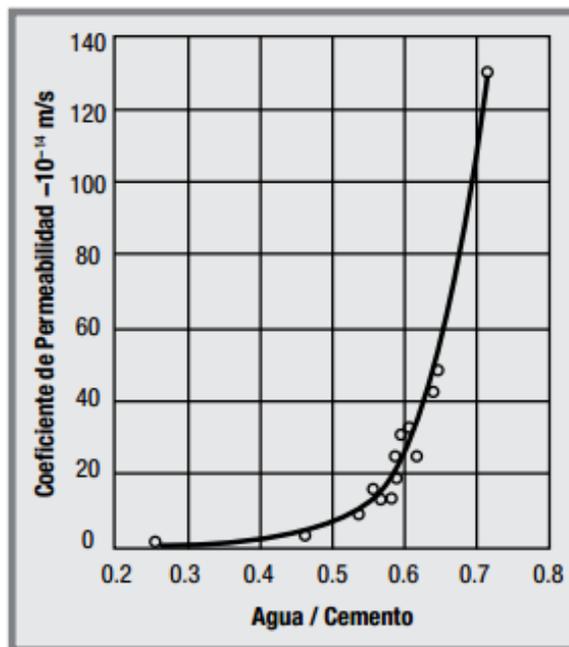
Una permeabilidad mayor del hormigón al agua, va a ser función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La permeabilidad de la pasta depende

también de la relación agua/cemento y del grado de hidratación del cemento, además de la duración y calidad del curado.

Un hormigón permeable es propenso a su desintegración, porque el agua que penetra en sus poros se expande por congelación sometándolo a tensiones que no puede soportar. Igualmente, la fácil penetración de sulfatos, ácidos y otros productos químicos agresivos aceleran el proceso de destrucción del hormigón, así como de las barras de acero en los hormigones armados.

Con menores relaciones a/c, la concentración creciente de granos de cemento en la pasta deja menos espacio entre ellos para ser ocupados por el agua, al estar más unidos unos con otros.

Inicialmente el espacio entre los granos de cemento forma una red continua llena de agua, formada por los poros capilares. A medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros y esto hace al hormigón menos penetrante. Los poros pequeños son bloqueados más fácilmente que los grandes, y mientras más granos de cemento se tengan (menor relación a/c) el bloqueo será mayor, con lo que se consigue una menor permeabilidad y un hormigón más durable.



*FIGURA 2.9: Coeficiente de permeabilidad al agua en función de la relación a/c.  
FUENTE: LA PERMEABILIDAD AL AGUA COMO PARÁMETRO PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN - PARTE I (2014).*

La permeabilidad del hormigón se calcula a partir de una condición de presión hidrostática sobre una de sus caras, y corresponde a la velocidad o al caudal de agua que atraviesa el material, debido a la diferencia de presión entre la cara en contacto con el agua y la cara que no lo está. El flujo de agua a través del hormigón, debido al empuje del líquido (gracias a la gravedad), depende de factores externos al material, como la altura de la lámina de agua y el espesor del elemento, pero también de factores internos, como la capacidad del material para contener el líquido (Sika, 2009).

El parámetro que en este caso describe la calidad del material es el coeficiente de permeabilidad al agua (K) de Darcy, el cual representa la facilidad con la que el material puede ser penetrado por el agua:

$$Q = -\frac{KA}{\mu} \frac{dp}{dz} \quad (2.4.)$$

Donde: Q es el caudal de un fluido de viscosidad cinemática  $\mu$ , que atraviesa un espesor dz de sección aparente A, bajo el gradiente de presión dP. Esta expresión supone un régimen laminar en los poros del material.

El término K corresponde a un área y se expresa en metros cuadrados. Esta magnitud se denomina permeabilidad intrínseca y no debe confundirse con el coeficiente de permeabilidad. Este parámetro, es una característica intrínseca del material y no depende del líquido utilizado para su medida.

Si el líquido en cuestión es agua, el gradiente de presión puede redefinirse como:

$$\frac{dP}{dz} = \gamma_w \frac{dh}{dz} \quad (2.5.)$$

Donde:

$\gamma_w$  es el peso específico del agua.

Debido a que la velocidad del flujo es  $v = Q/A$ , la ecuación se puede expresar en términos de velocidad (v) de la siguiente manera:

$$v = - \frac{K}{\mu_w} \gamma_w \frac{dh}{dz} \quad (2.6.)$$

Donde:

$\mu_w$  es la viscosidad del agua. Por lo que la velocidad del agua aparente se expresa como:

$$v = - K_w \frac{dh}{dz} \quad (2.7.)$$

Por lo tanto,  $K_w$  es el coeficiente de permeabilidad al agua y se expresa en m/s; no es una propiedad intrínseca del material ya que depende de los parámetros  $\gamma_w$  y  $\mu_w$ .

#### **2.6.2.2. Difusión.**

Corresponde por otro lado al desplazamiento de un compuesto, ion, líquido, etc a través de un medio, debido a una agitación aleatoria a escala molecular, relacionada esta, con la existencia de un gradiente de concentración. La difusión se determina en general sobre hormigones saturados. A través de este medio continuo, tiene entonces lugar la difusión de una sustancia (Sika, 2009).

El parámetro que cuantifica la capacidad de transporte por este mecanismo se denomina coeficiente de difusión  $D_f$ , definido en la primera ley de Fick:

$$J_x = D_f \frac{dC}{dx} \quad (2.8.)$$

Donde:

$J_x$  es el flujo constituyente en la dirección  $x$  y  $dC/dx$  es el gradiente de concentración en esa dirección.

Si se considera que el fenómeno de difusión tiene lugar en un poro capilar cilíndrico de radio  $r$ , la dimensión  $l$  del capilar no tiene ninguna influencia en la velocidad de

difusión, siempre que esa dimensión sea suficientemente grande comparada con el recorrido medio de las moléculas. En la práctica, el radio del capilar debe ser mayor que algunas decenas de nanómetros.

Los transportes por difusión pueden ocurrir en fase líquida o gaseosa. El primero involucra el transporte de sustancias en solución en la fase acuosa intersticial, y son ejemplo de este caso el ataque por agua de mar o por ácido carbónico de un suelo rico en materia orgánica.

El transporte de gases en los hormigones, se produce en general por difusión en el aire contenido en los poros y fisuras del material. La difusión en fase gaseosa involucra el proceso de desecación del hormigón ya parcialmente seco (transferencia de vapor de agua), así como la penetración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.

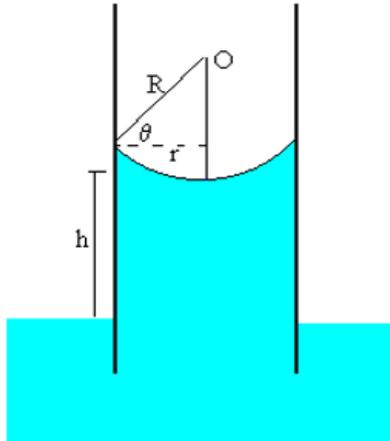
### **2.6.2.3. Absorción capilar.**

Corresponde al desplazamiento de un frente líquido a través de un capilar, como consecuencia de la interacción de las fuerzas de contacto (líquido – sólido). Este fenómeno de movimiento de agua tiene lugar en hormigones secos o parcialmente saturados (Sika, 2009).

Fenómenos capilares. Ley de Jurin

Si un líquido se encuentra en contacto con hormigón no saturado, las diferencias de humedad pueden dar lugar a la aparición de tensión capilar y con ella, al movimiento de un líquido hacia el interior de la masa del hormigón.

Cuando se coloca un tubo capilar verticalmente en un recipiente que contiene un líquido que moje, el líquido asciende por el capilar hasta alcanzar una determinada altura, mientras que, si el líquido no moja, el nivel de líquido en el capilar es menor que en el recipiente. Puede considerarse con gran aproximación que la superficie del menisco es un casquete esférico de radio R. La relación entre el radio del capilar r, el radio del menisco R y el ángulo de contacto  $\theta$ , se expresa como  $r = R \cos \theta$ .



*FIGURA 2.10: Ascensión del líquido en un tubo capilar.  
FUENTE: LA PERMEABILIDAD AL AGUA COMO PARÁMETRO PARA EVALUAR LA  
DURABILIDAD DEL HORMIGÓN - PARTE I (2014)*

Debido a la curvatura de la superficie, habrá una sobrepresión hacia el centro del menisco, que de acuerdo con la ley de Laplace (superficie de una cara), tiene el siguiente valor:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta \quad (2.9)$$

Por efecto de esta sobrepresión, el líquido asciende una altura  $h$ .

$$\Delta p = \rho g h \quad (2.10)$$

Dónde:  $\rho$  es la densidad del líquido,  $g$  es la constante gravitatoria y  $h$  es la altura a la que asciende el nivel del líquido en el capilar, la cual se expresa a continuación:

$$h = \frac{2\gamma}{r g \rho} \cos \theta \quad (2.11)$$

Esta expresión es la denominada ley de Jurín, de la cual se deduce que la altura a la cual se eleva o desciende un líquido en un capilar es directamente proporcional a su tensión superficial, e inversamente proporcional a la densidad del líquido y el radio del

capilar. Además de la altura alcanzada por el líquido, es posible estimar la velocidad de ascenso del flujo  $v$  en el tubo capilar, mediante la expresión propuesta por Washburn dada por:

$$v = \frac{r\gamma\cos\theta}{4d\mu} \quad (2.12.)$$

Donde:  $d$  es la profundidad de penetración del líquido, y  $\mu$  es la viscosidad del fluido.

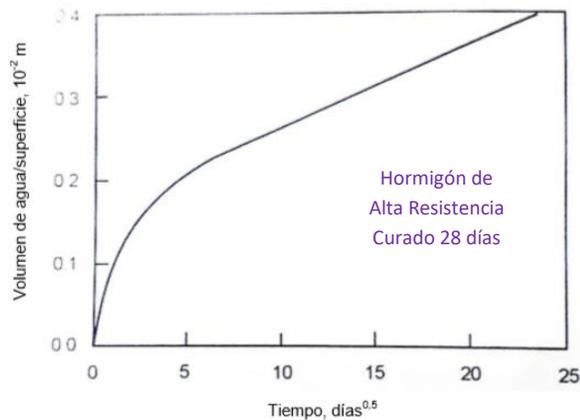
### **Capacidad de Absorción Capilar**

Cuando el transporte de líquidos en sólidos porosos se debe a la tensión superficial que actúa en los capilares, el transporte del líquido está influenciado por las características del mismo (viscosidad, densidad y tensión superficial) y por las características del sólido poroso (permeabilidad, estructura de poros, energía superficial). A partir de las leyes de Darcy y de Laplace es posible deducir que el peso de agua absorbida por unidad de superficie ( $W/A$ ) en el tiempo  $t$  se expresa:

$$\frac{W}{A} = S t^{1/2} \quad (2.13.)$$

Dónde:  $S$  la capacidad de absorción capilar. (Velocidad)

La experiencia muestra que si se considera la absorción capilar a edades más largas (un par de semanas), esta expresión sobreestima la masa de agua absorbida. Se considera que una vez superada la capacidad de absorción inicial, distintos mecanismos provocan una reducción de la velocidad de absorción.



**FIGURA 2.11:** *Volumen de agua absorbida por un hormigón en función del tiempo.*  
**FUENTE:** LA PERMEABILIDAD AL AGUA COMO PARÁMETRO PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN - PARTE I (2014).

Tanto la permeabilidad como la absorción capilar dependen fundamentalmente del tamaño de los poros, mientras que la difusión, depende principalmente de la interconexión de la red porosa.

#### **2.6.2.4. Convección o flujo por convección.**

Este proceso se debe a que una sustancia es arrastrada por el movimiento de otra que la contiene.

#### **2.6.2.5. Electromigración.**

Al igual que la permeabilidad y la difusión se refiere al movimiento de un compuesto o una sustancia (líquida en este caso) debido a la presencia de un gradiente. La diferencia o gradiente en este caso, corresponde a una diferencia de voltaje.

#### **2.6.2.6. Mecanismos de transporte más frecuentes del agua al interior del hormigón.**

En el mundo de la construcción el agua puede penetrar en el hormigón de acuerdo a cualquiera de los mecanismos arriba mencionados, sin embargo, los fenómenos más frecuentes y de mayor preocupación frente a la contención de líquidos o penetración al interior del material son; permeabilidad, absorción capilar y difusión,

### **¿Cuál es la preocupación por la penetración o en el peor de los casos por el paso de agua a través del hormigón?**

En realidad, más allá de la necesidad obvia por no perder el líquido en estructuras de contención y conducción, o impedir su entrada en lugares donde no se desea. La penetración de agua al interior del hormigón está relacionada con la durabilidad de la estructura misma. La penetración de agua al interior del hormigón está directamente relacionada con el ingreso, redistribución o pérdida de sustancias que pueden ser perjudiciales o benéficas al hormigón, al refuerzo o ambos elementos.

Dentro de estos casos tenemos:

- Transporte de sulfatos, desde fuentes extremas alcanzando los aluminatos de la pasta de cemento y generando compuestos expansivos (etringita) al interior del hormigón. Los sulfatos en estado sólido son prácticamente inocuos sobre la pasta de cemento. Es necesario que estén diluidos y que penetren la red porosa y una vez en el interior estos pueden empezar a reaccionar con los compuestos de la pasta de cemento hidratada, generando entonces nuevos sólidos que fisuran el material.
- Ingreso de cloruros, diluidos en agua de mar o provenientes de otras fuentes son transportados en agua al interior del hormigón hasta alcanzar el acero de refuerzo e inician o aceleran la corrosión del mismo.
- Hielo – deshielo, el agua luego de penetran y saturar la red capilar. Puede congelarse generando presiones sobre la fase sólida microfisurandola ciclo a ciclo.
- Lixiviación de hidróxido de calcio y álcalis, la entrada y salida del líquido diluye y arrastra parte de los componentes de la pasta de cemento debilitando el material.
- Generación del gel álcali – sílice, el agua se constituye en un componente indispensable del gel expansivo resultante de la combinación de álcalis y el sílice inestable de algunos agregados. La penetración de agua al interior del

material aumenta las probabilidades de generación de gel y su volumen total. La difusión de los álcalis depende en buena parte de la continuidad del agua al interior del hormigón.

- Sustitución del Calcio por Magnesio en agua de mar solo es posible con la penetración del líquido al interior del material.

#### **2.6.2.7. Ventajas y desventajas de los mecanismos de transporte del agua en el hormigón.**

La penetración de agua al interior del hormigón genera riesgos sobre la durabilidad y funcionamiento de la estructura, incluso cuando no ha sido concebida para la contención del líquido. Se puede ver la penetración de agua como benéfica solo en ciertos casos como el hormigón drenante (diseñado justamente como un filtro).

De esta forma para la mayor parte de las aplicaciones en construcción de hormigón reforzado, la penetración de agua se califica como un problema que puede comprometer el funcionamiento de la estructura.

Los fenómenos de ataque a la durabilidad de la estructura más frecuentes están relacionados más con la penetración por absorción capilar que con la permeabilidad. Los hormigones completamente saturados donde gobierna la permeabilidad no disponen de suficiente oxígeno. En el caso de la corrosión por cloruro, los cloruros penetran sobre todo por difusión y absorción capilar, el hielo – deshielo igualmente implica absorción capilar. Solo los sulfatos, el álcali y la sustitución de Ca por Mg tiene lugar en condiciones de completa saturación.

Un hormigón al que no le penetre el agua o lo haga muy superficialmente se beneficiara justamente frente a los fenómenos arriba listados ya sea eliminándolos como disminuyendo su efecto.

En las estructuras de hormigón destinadas a conducir o contener agua, el interés por tener un concreto impermeable se concentra en no perder el líquido. A si mismo existen estructuras en las que se busca exactamente lo contrario, mantenerlas secas en el interior donde el agua no es deseable. De esta forma estructuras como túneles, sótanos o estacionamientos rodeados por suelos húmedos, niveles freáticos o estructuras de

hormigón literalmente sumergidas en el mar como las plataformas Offshore, deben permanecer estancas (Sika, 2009).

En la década de 1980, sorptividad se utiliza para describir la propiedad de transporte con mayor importancia del hormigón. Endurecida la pasta de cemento, que consiste en cemento, agregados y vacíos, rara vez saturado en materiales de construcción. A menudo, la permeabilidad se utiliza como un sustituto para la durabilidad, pero esto no es del todo precisa. La permeabilidad se refiere el movimiento de la humedad a través de un medio poroso saturado bajo un gradiente de presión. La existencia de una estructura de hormigón en tales condiciones se considera muy poco probable y así sorptividad se convierte en una característica más precisa de describir la durabilidad de una estructura de hormigón, describir algunas propiedades del hormigón.

En contraste con los materiales, en los que las fuerzas capilares están ausentes completamente saturado, absorción capilar se convierte en la causa principal de la entrada de líquido en estructuras de hormigón. En las estructuras arriba del suelo, el sol y el viento secan la región expuesta del hormigón mientras que el núcleo se mantiene en un mayor grado de saturación. Esta diferencia en la saturación crea fuerzas capilares que se convierten en el mecanismo de transporte dominante (McCarter, 1993).

La aplicación de la prueba de capacidad de absorción de hormigón se hizo más importante ya que había una preocupación mundial acerca de la poca durabilidad de las estructuras de hormigón, la forma más dominante de deterioro es la corrosión del acero de refuerzo debido a la entrada de humedad a través de la piel de la superficie del hormigón. La sorptividad ha demostrado ser sensible a la calidad de la piel de la cubierta de los elementos de hormigón y ha demostrado ser eficaz para revelar mala colocación y técnicas en obra acabado (McCarter, 1993). Ayuda adicional se le dio a las pruebas de capacidad de absorción, ya que se descubrió que la prueba también era sensible a la profundidad del hormigón. Las muestras que se probaron a diferentes profundidades para sorptividad dieron resultados diferentes, que podrían ser indicativos de señales de segregación o sangrado debido a malas prácticas de

construcción (Khatib y Mangat 1995). Figura 2.12 se muestra el aumento de la absorción en la superficie llana de la muestra.

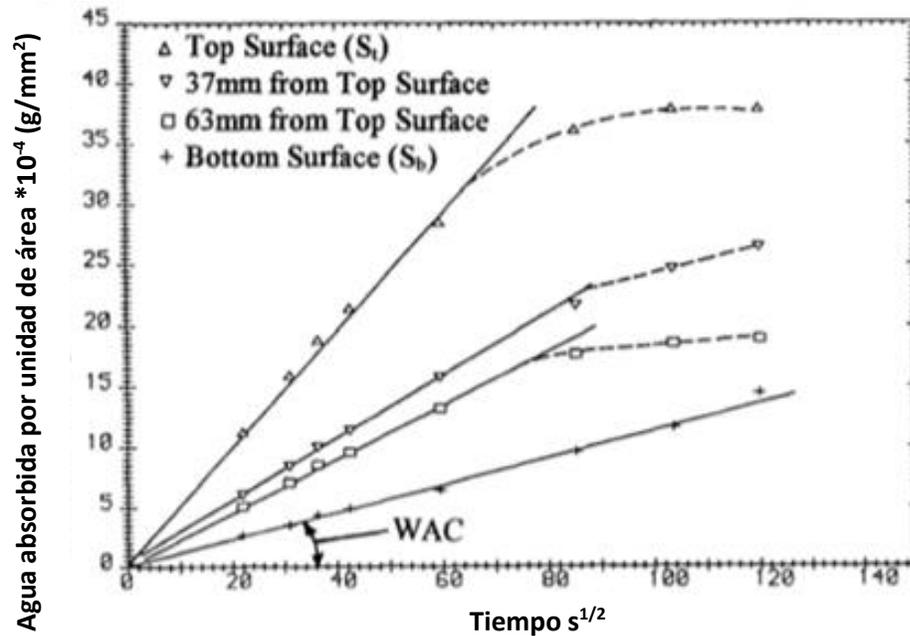


FIGURA 2.12: Curvas relativas de absorción a la profundidad de iiiiutyrg  
FUENTE: Khatib and Mangat 1995.

Desde mediados de los 1990, se acepta generalmente que un hormigón de buena calidad estaba representado por los valores de sorptividad bajos y extenso trabajo que se había hecho en la influencia de varios factores del mismo (Ho y Chirgwin, 1996). Después del análisis de los mecanismos de transporte muestran que el de mayor importancia es el de la Absorción capilar, por estar relacionado con más propiedades del hormigón; por esas razones se hará el estudio de la Absorción Capilar.

### 2.6.3. Absorción Capilar.

La penetración de agua al interior del hormigón basado en el fenómeno de absorción capilar se considera como el mecanismo básico más frecuente de transporte de agua en las estructuras de hormigón.

El agua al tocar la superficie de un hormigón convencional sufrirá así un efecto de atracción similar al producido por una esponja. Un concreto seco de 28 días de edad con una relación agua/cemento de 0.60 luego de 3 horas de contacto con el agua (una

lluvia) ya ha absorbido  $2 \text{ L/m}^2$ . Si este concreto tiene una porosidad del 15% eso significa que el agua ya ha penetrado en algunos puntos hasta 1.2 cm.

La velocidad de penetración por absorción capilar en un hormigón seco puede ser del orden de un millón de veces más rápido que el del mismo volumen de agua que atraviesa el mismo hormigón bajo un gradiente de presión, es decir por permeabilidad. Las estructuras de hormigón expuestas a ciclos de humedecimiento y secado (lluvia, variación de mareas, variación de altura de niveles freáticos, etc) sin duda representan un número mayor que aquellas que están en contacto permanente con agua y que además están expuestas a una presión de agua constante.

Sobre la superficie de un cuerpo líquido como el agua, tiene lugar un ordenamiento molecular que se orienta en el plano horizontal debido a la gravedad y a las fuerzas atómicas entre las partículas (en el espacio el líquido flotara esférico). Sobre esta superficie de líquido se crea entonces una tensión paralela al plano conocida como tensión superficial.

El efecto de “sabana templada” que genera la tensión superficial, al contacto con un sólido interaccionan con las fuerzas de adherencia solido/líquido y en el caso por ejemplo de un capilar que contiene agua, provoca que la superficie de líquido se curve (hacia arriba o hacia abajo) formando ese menisco que nos es tan familiar en tubos y en capilares. Sin embargo, más impresionante aun, la interacción de estas fuerzas, hace que en la mayor parte de los casos la tensión superficial provoque un movimiento ascensional del líquido venciendo la gravedad.

El avance de un líquido por capilaridad no está por supuesto limitado a la ascensión, en realidad la fuerza capilar se puede dar en cualquier dirección en el espacio, puede ser oblicua o descendente. Luego de unas horas de lluvia sobre una fachada de ladrillo el agua impregna la superficie y penetra horizontalmente por capilaridad. Así los materiales porosos en contacto con líquidos están expuestos a la penetración de estos a través de su red de capilares (Sika, 2009).

El fenómeno se ha intentado predecir y modelar durante mucho tiempo, hoy en día una de las formas más aceptadas para describir el movimiento del agua en un medio poroso (hormigón, roca, ladrillo, etc) es la expresión de HALL:

$$IA = \frac{mt}{a * d} \quad (2.14.)$$

IA = índice de absorción, en mm,

mt = el cambio en la masa del espécimen en gramos, en el momento t,

a = el área expuesta de la muestra, en mm<sup>2</sup>,

d = la densidad del agua en g / mm<sup>3</sup>.

$$IS = \frac{IA}{\sqrt{t}} \quad (2.15.)$$

IS = Sorptividad,

IA = Índice de absorción,

t = Tiempo en el momento t,

Esta expresión predice así la penetración del agua para las primeras horas de contacto entre el medio poroso y el líquido cuando el sólido se encuentra inicialmente seco. Así el parámetro S es una característica del material y se conoce como la Sorptividad, que describe la “VELOCIDAD” de penetración por absorción capilar.

La sorptividad del hormigón depende al igual que el coeficiente de permeabilidad (K), de las características geométricas de la red porosa del material. Si bien el presente documento se concentra en las propiedades del hormigón y la relación entre su composición y la penetración del agua, es necesario señalar que uno de los parámetros que mayor influencia tiene sobre la penetración por absorción capilar es el estado de saturación del material. El avance de agua dentro de la red porosa por absorción capilar solo es posible en hormigones, morteros o pastas no saturadas. El porcentaje de saturación del medio juega un papel fundamental en la velocidad y cantidad del líquido penetrado.

La absorción capilar que predomina como mecanismo de penetración en las estructuras de hormigón puede atravesar en 24 horas, por ejemplo, para un valor de Sorptividad (IS) de  $133 \cdot 10^{-4}$  (mm/s<sup>0.5</sup>), 4 mm para un hormigón convencional.

Es difícil que un tanque o una presa vean afectados sus niveles por pérdidas de agua debidas a la absorción capilar, sin embargo, la absorción capilar si es la responsable de la mayor parte de las humedades de viviendas y estructuras en contacto con suelos eventualmente húmedos.

Un hormigón con una matriz cerrada tendrá valores de sorptividad en extremo bajos que no permitirán la penetración de agua por absorción capilar ni siquiera para tiempos muy prolongados.

Desde el punto de vista de la construcción para vivienda y en las ciudades, el control de penetración de agua por absorción capilar juega un papel crucial en la calidad de vida de las personas. Por ello durante décadas se han empleado diversas tecnologías destinadas a eliminar en primeros pisos las húmedas en hormigón, mortero o muros en mampostería. Estas tecnologías en su mayoría se concentrado en el uso de sustancias o aditivos bloqueadores de poros que interrumpen la penetración del líquido.

Desde el punto de vista de las obras de infraestructura la absorción capilar ha sido en general subestimada. En un muelle los pilotos y las placas que están expuestas a la variación de mareas y las zonas de salpique son definitivamente las áreas más vulnerables frente a la corrosión del acero provocada por la penetración de cloruros diluidos, se hace básicamente a través de absorción capilar. En estas zonas la presencia de: oxígeno suficiente (en la zona sumergida hay muy poco), del ion cloruro y del agua que actúa como el medio a través del cual viajan los iones, cuenta justamente con la combinación ideal para la corrosión. Es decir, si se pretende estudiar la facilidad con la que un hormigón permitirá o no la corrosión del acero debería evaluarse su coeficiente de absorción capilar o Sorptividad más que su permeabilidad o difusión de cloruros en un medio completamente saturado.

De la misma manera los fenómenos de lixiviación del hormigón y de cristalización de sales en la superficie del mismo están definitivamente asociados a ciclos de humedecimiento y secado gobernados por la absorción capilar.

Por supuesto la penetración de agua por absorción capilar sobre una superficie de hormigón depende no solo de la composición original del material sino también de factores relacionados como la presencia de hidrofugantes, recubrimientos, de la

orientación del vaciado del hormigón y la cara en contacto con el agua, de si fue curada o no la superficie y por supuesto de la presencia o no de fisuras. Sin embargo, el presente documento se concentrará solo en los aspectos de composición del hormigón y de como un hormigón se considera de baja permeabilidad o “impermeable”.

### 2.6.3.1. Prueba de Absorción.

En respuesta a la idea de que las propiedades de absorción proporcionan los datos más útiles en relación las propiedades y con la durabilidad del hormigón, se han desarrollado varias pruebas para estudiar las propiedades de absorción siendo las más comunes:

#### a. Prueba Inicial absorción superficial (ISAT)

El aparato ISAT se compone de dos tubos que conducen a una tapa de área conocida. Uno se utiliza como un depósito que suministra agua a la superficie y el otro está conectado a un tubo capilar calibrado para medir la velocidad de absorción. La figura muestra la configuración de la prueba.

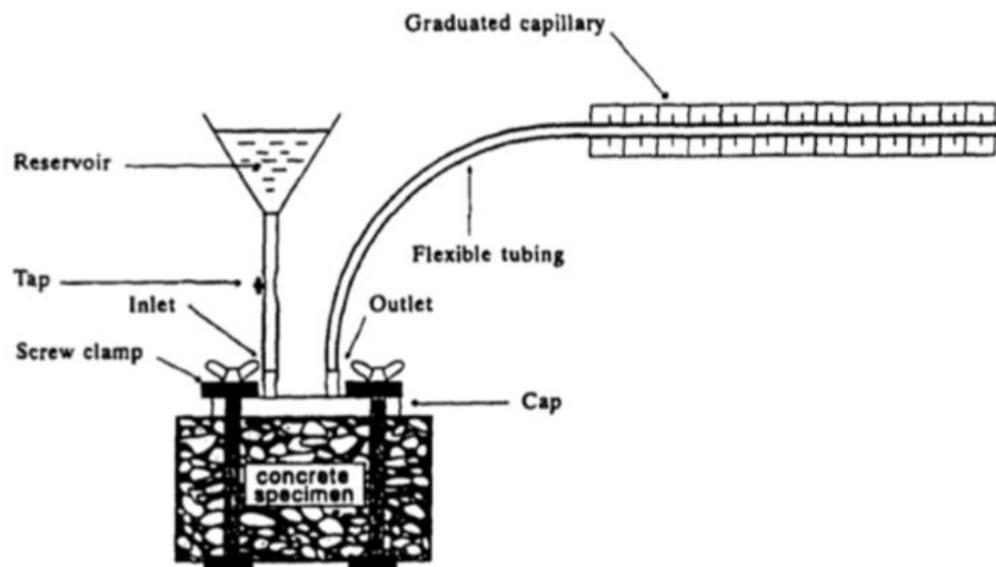


FIGURA 2.13: Disposición esquemática de un aparato ISAT.  
FUENTE: Claisse 1997.

La teoría detrás de la ISAT se basa en la suposición de que el hormigón seco absorbe el agua a una velocidad inicial más alta. La velocidad de absorción sería entonces disminuir a medida que los huecos capilares se llenan de humedad (Claisse 1997) . La ecuación para un líquido viaja a través de un único tubo capilar está dada por la siguiente:

$$ISA = \frac{F}{\Theta} = at^{-n} \quad (2.16.)$$

Dónde: ISA es la absorción inicial ( $m^3 / m^2 / s$ ), t es el tiempo (s) de absorción; a, n son parámetros de regresión;  $\Theta$  es el área bajo la tapa ( $m^2$ ); y F es el caudal ( $m^3 / s$ ) (Levitt, 1969).

#### **b. La prueba de absorción Covercrete (CAT)**

El método CAT es muy similar a la de ISAT. La diferencia es que la absorción se mide en toda la profundidad de un agujero 50 mm perforado en el recubrimiento de hormigón. Este método fue desarrollado para superar los efectos localizados tales como la carbonatación en las propiedades de absorción (Claisse, 1997; Dhir y Hewlett, 1987). El procedimiento de ensayo es el mismo que el ISAT. La figura 2.14, representa la configuración de la prueba.

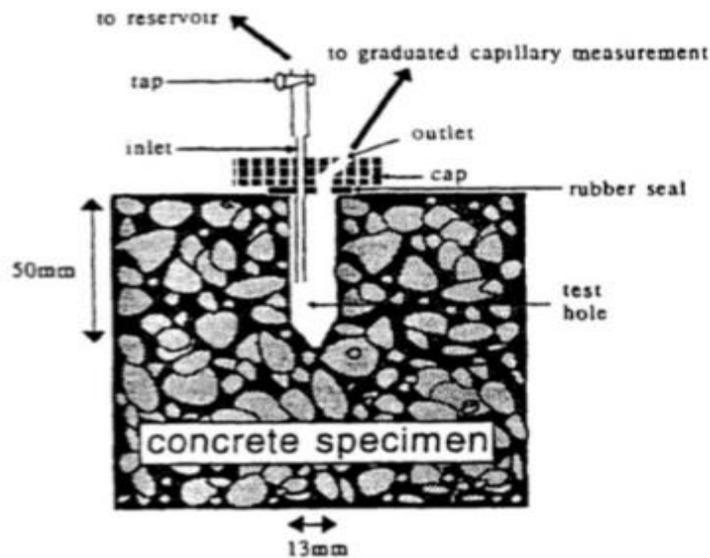


FIGURA 2.14: Disposición esquemática del método CAT  
FUENTE: Claisse 1997

Aunque estas dos pruebas miden directamente la velocidad de absorción capilar, las pruebas se llevan a cabo durante un período de una hora. Se ha afirmado que estas pruebas proporcionan información suficiente con respecto a la modelización de las propiedades de transporte capilar a largo plazo y que se limitan a la descripción de los efectos de superficie sobre la absorción capilar (Martys y Ferraris, 1997).

### c. Sorptividad (Velocidad de capacidad de absorción)

Consiste en la medición del índice de absorción llamado sorptividad al agua por HALL. Probar la utilidad de la medición de capacidad de absorción de servicio predicciones de vida se realizó mediante la prueba de capacidad de absorción. Como se ha descrito brevemente, una muestra de núcleo de hormigón se coloca en una sartén y se expone a un líquido en un plano, el nivel de líquido en el recipiente se mantiene constante para evitar discrepancias debidas a los gradientes de presión. A intervalos regulares, la masa de la muestra de núcleo de hormigón se pesa y la cantidad de fluido absorbido se normaliza por el área de sección transversal de la superficie expuesta. La configuración de la prueba se ilustra en la Figura 2.15:

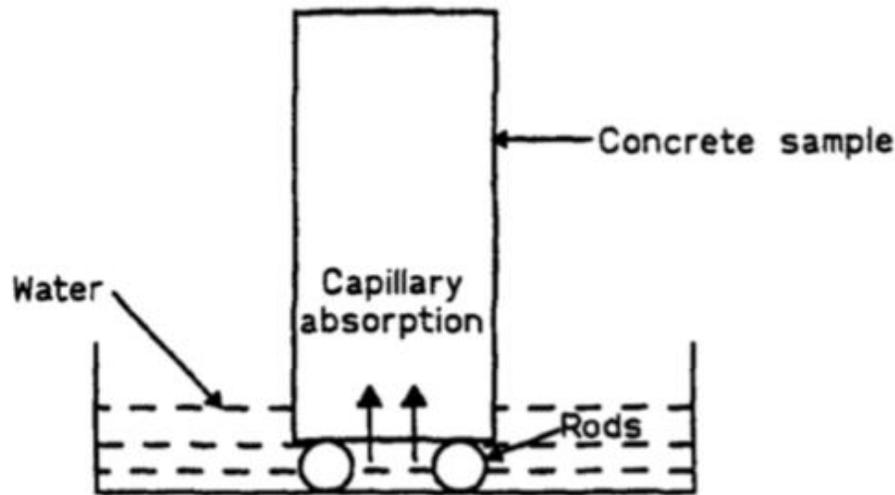


FIGURA 2.15: Esquema de la disposición Sorptividad.  
FUENTE: Claisse 1997.

### 2.6.3.2. Norma para determinar el Índice de Absorción (Sorptividad).

Adicional aceptación de sorptividad condujeron al desarrollo de modelos de vida de servicio basado en sorbilidad como CONCLIFE (Bentz, 2001). En combinación con el trabajo realizado por (Hooton y Desouza, 1998) lo que condujo a la estandarización de la prueba de capacidad de absorción como la norma ASTM C 1585. La literatura ha sugerido que los especímenes pueden aplicar sobre sus lados curvos y estar moderadamente previamente acondicionado durante 3 días a 50°C (días 2004). En la siguiente sección derivado del Portland Cement Association (PCA) Investigación y Desarrollo Diario detalla el desarrollo del método de ensayo ASTM C 1585 (Ferrari y Stutzman 2006).

La influencia significativa del grado de saturación en sorptividad sugirió que la humedad relativa (HR) de las muestras pre-acondicionado sea alrededor de 60% a 80% de emular las condiciones de campo, esto HR debe ser uniformemente posible a través de todas las muestras lo más rápidamente posible y sin el uso de instrumentos sofisticados para garantizar una amplia gama de aplicaciones. Para lograr estas condiciones, las muestras se colocaron en el horno a 50°C en un desecador con solución de bromuro de potasio durante 3 días esto para poder controlar la HR, luego se colocan

en recipientes herméticos para al menos 15 días, el contenido de agua en las muestras se consideró uniformes en todos los especímenes.

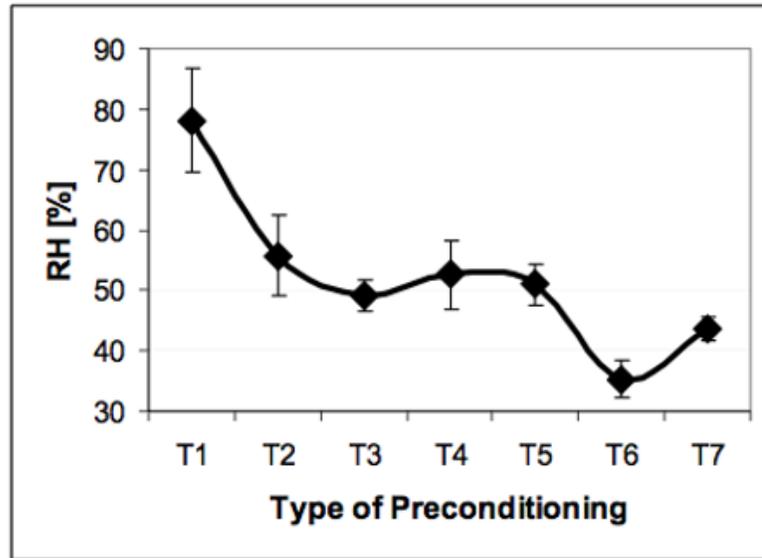


FIGURA 2.16: Humedad Relativa vs Tiempo de Acondicionamiento  
FUENTE: (Ferrari y Stutzman 2006)

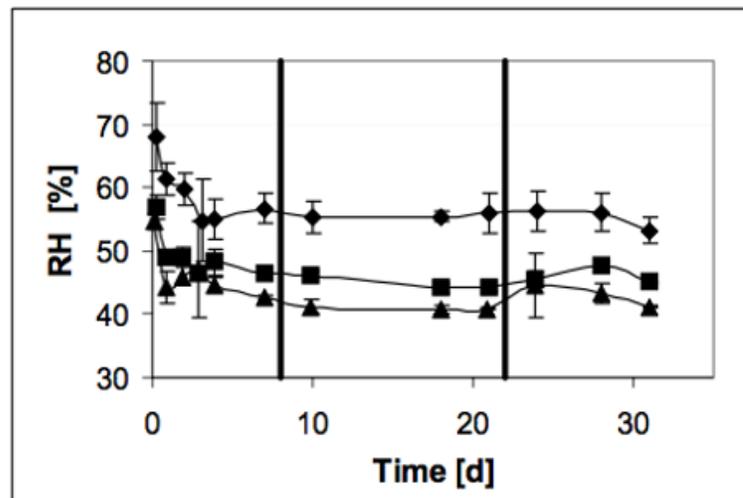


FIGURA 2.17: Humedad Relativa de los contenedores vs Tiempo de Acondicionamiento  
FUENTE: (Ferrari y Stutzman 2006)

Como se muestra en la figura 2.17, la HR dentro de los contenedores sellados no cambió significativamente después de 10 días y, por tanto, un criterio de 15 días fue

establecido para garantizar un derecho uniforme en toda la muestra. Siguiendo pre-acondicionado, especímenes tenían que ser sellados a lo largo de sus lados curvos. Cinta aislante o cinta adhesiva se suele utilizar para este propósito. Actualmente, el uso de cintas se ha traducido en resultados sesgados causada por fugas o filtraciones a lo largo del borde de ejemplares debido a la pobre adherencia entre la cinta y el hormigón. Este fenómeno puede verse en la Fotografía 2.1.



*FOTOGRAFIA 2.1: Fuga de agua entre la cinta y el espécimen  
FUENTE: (Ferrari y Stutzman 2006)*

La configuración de prueba Sorptividad ha mostrado ser sensible a las condiciones límite. Sobre la base de pruebas Sorptividad ASTM C 1585 consiste en someter una muestra de hormigón en forma de disco (100 mm de diámetro y 50 mm de espesor) en una cara de la exposición al agua. A fin de garantizar un flujo unidireccional, el resto de las superficies de la pieza que no están inmersos debe sellarse adecuadamente con un material adecuado. Después de escanear la literatura, se hizo evidente que una amplia variabilidad de valores sorptividad existe, en función de la elección del sellador. Éstos incluyen la cinta de aislamiento eléctrico, grasa y parafina (Claisse Caliskan, 2006; 1997; 2007; Yazicioglu Gonen y Taha 2001). (Sabir ,1998) ha sugerido incluso una prueba que se realice con pintura bituminosa, epóxica. Con esa variabilidad en los parámetros de la prueba, la posibilidad de una comparación entre los resultados se deteriora. El trabajo ha demostrado que la condición de contorno

de la superficie de ensayo puede afectar significativamente la absorción de agua de los especímenes comunes (numerosos mártires y Ferraris,1997). Por lo tanto, una especificación más detallada del material de sellado necesarias en el estándar para producir resultados que sean más coherentes y comparables.

Hall (1986) y la Norma ASTM C 1585 propone un ensayo experimental el cual describimos en 3.3.4. para la medición del Índice de Absorción.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. Metodología de la Investigación.**

Benítez (2014), en uno de sus principios dialécticos de la Ingeniería Estructural, establece que “la Ingeniería Estructural representa una síntesis entre lo empírico y racional, puesto que se nutre de ambas corrientes del pensamiento científico. Las dos corrientes permiten, a la Ingeniería Estructural, la transformación de lo abstracto pensado y concreto pensado en concreto real”.

Lo formulado por el mencionado autor, significa que en la Ingeniería Estructural se usan, habitualmente, métodos empíricos y métodos teóricos para realizar investigación. Precisamente, en este trabajo de investigación se usan, como se ve más adelante, métodos empíricos y métodos teóricos.

Los métodos empíricos, se refieren fundamentalmente al trabajo de campo, en este caso, se refieren a la selección de los bancos de materiales y a la extracción de muestras de los bancos de materiales Temporal, Rancho y Camacho.

Asimismo, dentro de los métodos empíricos, se tiene un programa experimental (laboratorio), que constituye la parte fundamental de la presente investigación, este programa experimental es explicado en el punto 3.3.4.

Los métodos teóricos (rationales) son usados, en este trabajo, para lo siguiente:

- En primer lugar, para analizar y sistematizar toda la información y mediciones generadas en la parte empírica y el programa experimental.
- Para construir, mediante el apoyo de la estadística (métodos de regresión) modelos matemáticos que expresan relaciones entre las variables fundamentales de esta investigación, a saber: propiedades del hormigón (resistencia a la compresión simple) y variables inherentes al transporte del agua a través del hormigón (absorción y sorptividad).

La construcción y formulación de los modelos de regresión se hizo mediante el método matemático de los mínimos cuadrados y, para la automatización de los cálculos, se ha usado el software Statgraphics.

Por otra parte, siempre dentro de los métodos de investigación, en general, se tienen:

- El método inductivo;
- El método deductivo o hipotético deductivo.

Es común hacer referencia que, en general, las ciencias naturales (experimentales) usan el método inductivo, que consiste en estudiar casos singulares para, a partir de ellos, formular cuestiones generales, como leyes o regularidades.

En tanto que, el método deductivo permite hacer el trabajo inverso, es decir, formular soluciones particulares a partir de principios, leyes y teorías generales.

En general, el método inductivo distingue cuatro estadios o fases en una investigación científica, a saber (Hempel, 1992):

- (1) Observación y registro de todos los hechos singulares.
- (2) Análisis y clasificación de éstos.
- (3) Derivación inductiva de generalizaciones a partir de ellos.
- (4) Contrastación ulterior de las generalizaciones.

El trabajo experimental desarrollado en esta investigación ha seguido el método inductivo, por las siguientes razones:

- (a) A las muestras seleccionadas (agregados) y modelos físicos construidos (probetas) se les ha hecho determinaciones particulares, a saber, propiedades de los agregados, mediciones de las resistencias a la compresión simple y de las variables inherentes al transporte del agua en el hormigón (absorción y sorptividad). Es decir, se han hecho determinaciones particulares o singulares.
- (b) Se han registrado, analizado, clasificado y sistematizado las observaciones y mediciones singulares realizadas caracterización de los agregados (granulometría, peso específico y peso unitario) para los tres bancos de materiales en estudio.
- (c) A partir de las determinaciones particulares o singulares, hechas para las variables mencionadas en el párrafo precedente, se han estudiado las relaciones entre estas variables y se han formulado modelos matemáticos, traducidos en ecuaciones, que expresan precisamente estas relaciones y que permiten obtener conclusiones generales, tal como lo establece el método inductivo. En este caso, se usa la matemática como un instrumento de abstracción de la realidad objetiva, es decir, para modelar los fenómenos estudiados (Benítez, 2014).
- (d) Los modelos permiten generalizar la relación entre las variables estudiadas y su contrastación empírica ulterior.

También es pertinente señalar que, tal como refiere Benítez (2014), los modelos físicos, por ejemplo, las probetas y especímenes contruidos para la presente investigación, representan un momento intermedio entre el proceso de tránsito de lo abstracto pensado y concreto pensado a lo abstracto real (el proyecto una vez construido).

Se trata, en suma, de una investigación fundamentalmente experimental, con momentos teóricos puntuales, referidos especialmente a la construcción y desarrollo de los modelos matemáticos.

### **3.2. Etapa Empírica.**

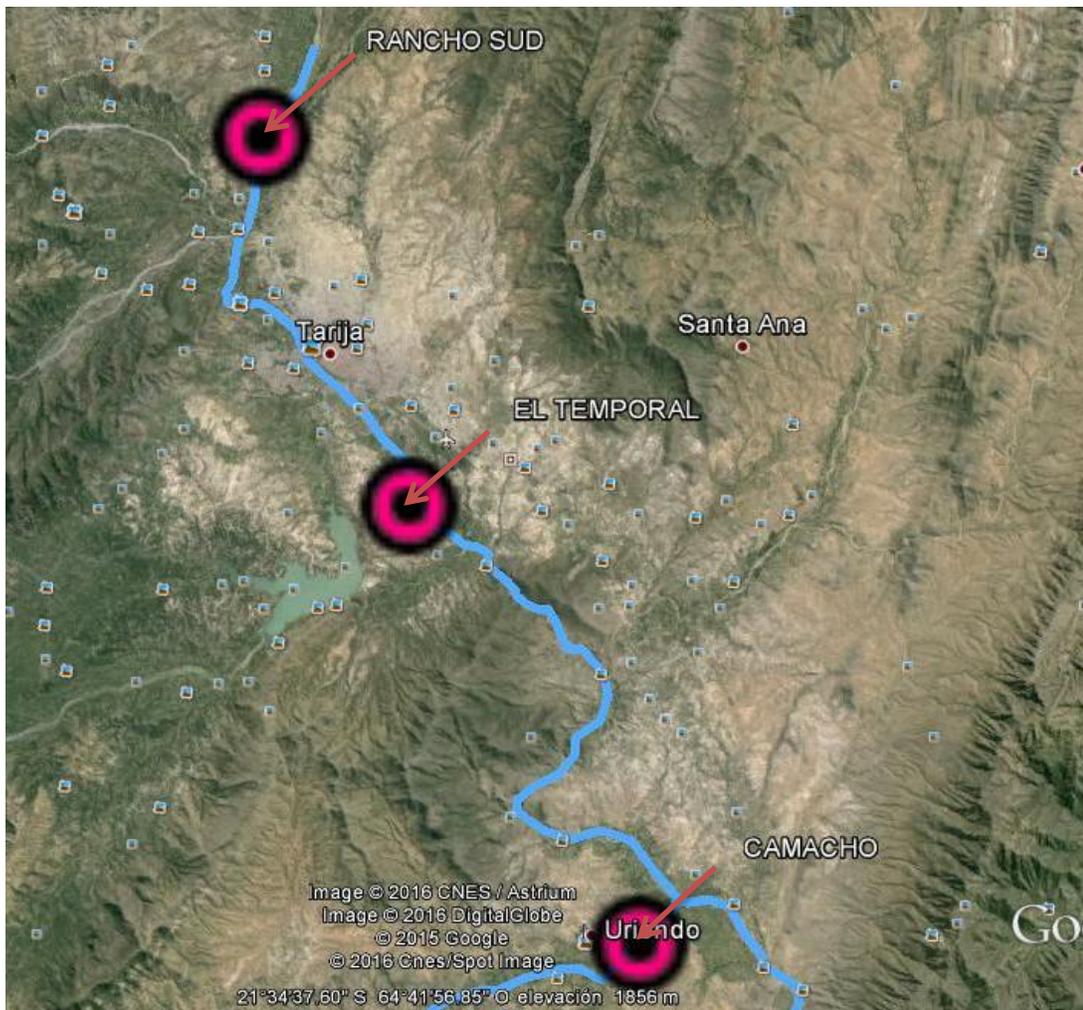
#### **3.2.1. Ubicación de los materiales de la investigación.**

##### **3.2.1.1. Agregados**

Los agregados empleados para la investigación se seleccionaron tomando en cuenta los más usuales para la construcción y tratando de abarcar diferentes cuencas de Tarija las más cercanas a la ciudad.

##### **3.2.1.1.1. Extracción de los agregados**

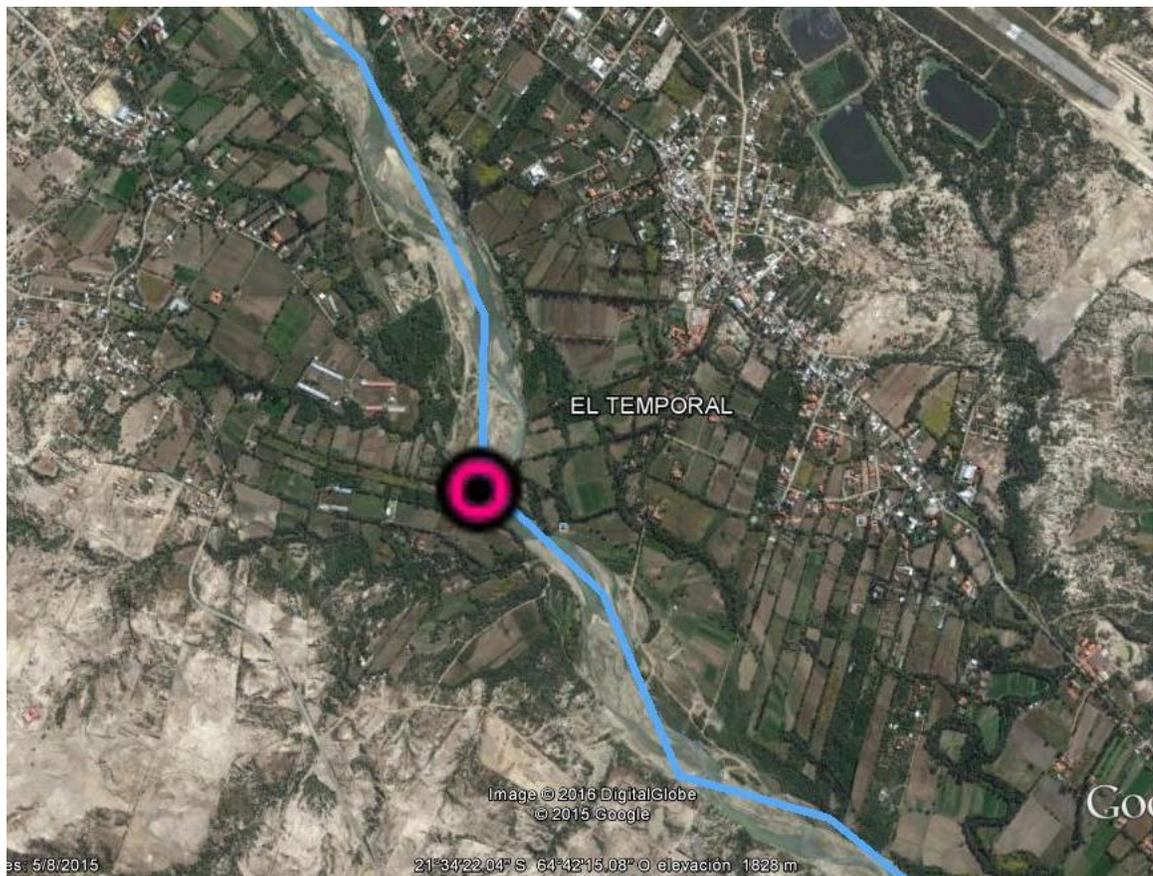
Los agregados fueron extraídos de acuerdo con el método para extraer y preparar muestras (ASTM C 75 AASHTO T2), el cual establece los procedimientos que se deben seguir para preparar muestras representativas de áridos finos, gruesos e integrales para fines de ensayos (Pérez Droguet, 2007). Las muestras extraídas son de yacimiento con frente descubierto de árido en su sitio de depósito natural, no sometido a tratamiento alguno.



*FOTOGRAFIA 3.1: Ubicación de los bancos de agregados empleados para la investigación  
FUENTE: google earth*

### **a) Temporal**

La cantera de Temporal se encuentra situada al Sureste de la ciudad de Tarija, aproximadamente a 7 Km entre  $21^{\circ}34'26,13''$  latitud sur y  $64^{\circ}42'26,48''$  latitud oeste, los materiales provienen del río Guadalquivir, contribuyendo los ríos de Erquiz, La Victoria, quebrada El Monte, quebrada San Pedro y Tolomosa. La explotación actual se extiende desde la zona de San Luis hasta la Angostura.

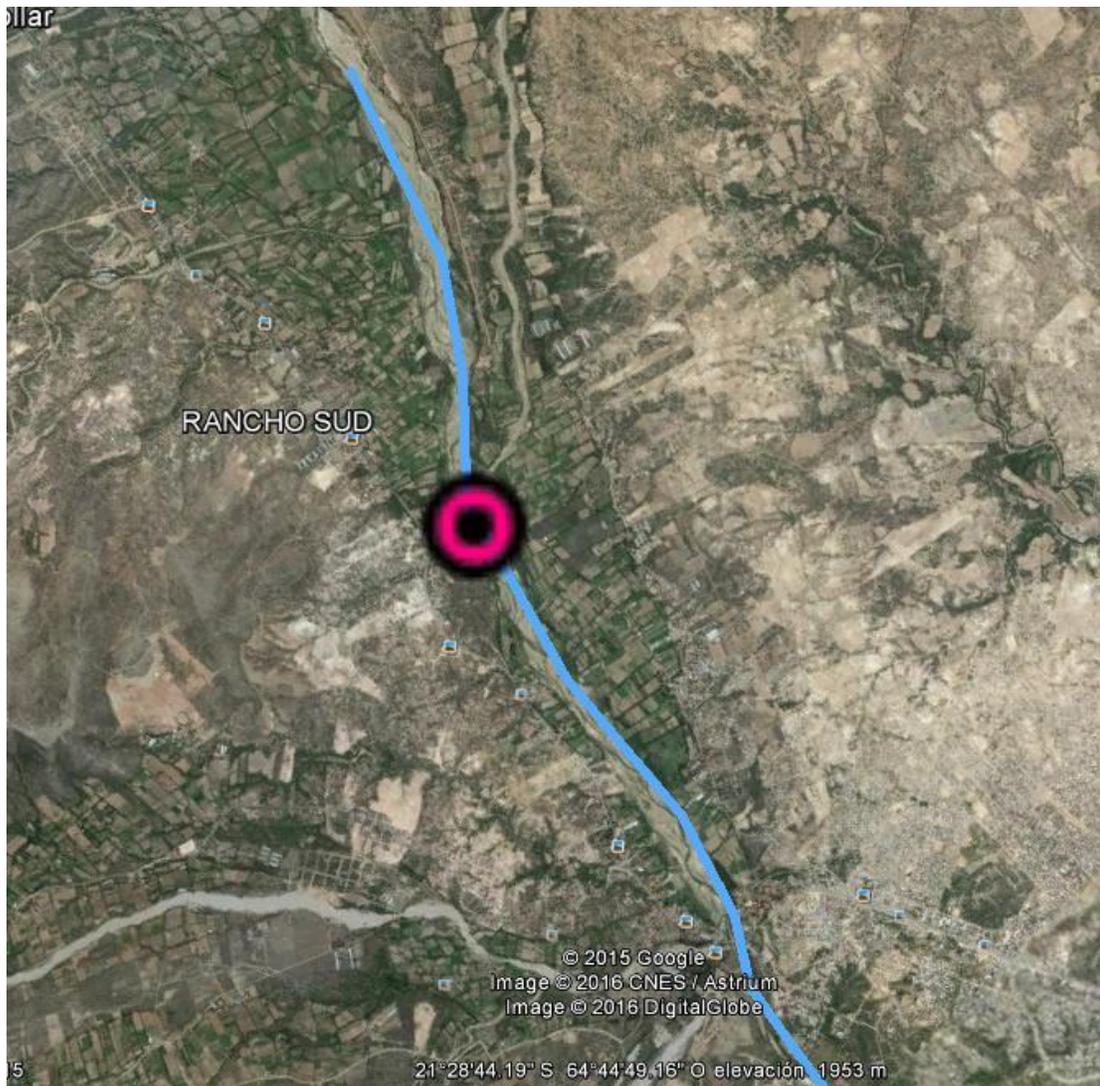


*FOTOGRAFIA 3.2: Ubicación del banco de agregados el Temporal empleado para la investigación*

*FUENTE: google earth*

### **b) Rancho**

La cantera de Rancho se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Tarija aproximadamente a 10 Km entre  $21^{\circ}28'17,34''$  latitud sur y  $64^{\circ}43'9,09''$  latitud oeste, los agregados provienen del río Guadalquivir al cual aportan los ríos de Sella, Corana, Carachimayo, Canasmoro, San Lorenzo, P'ajchanis y Calama.

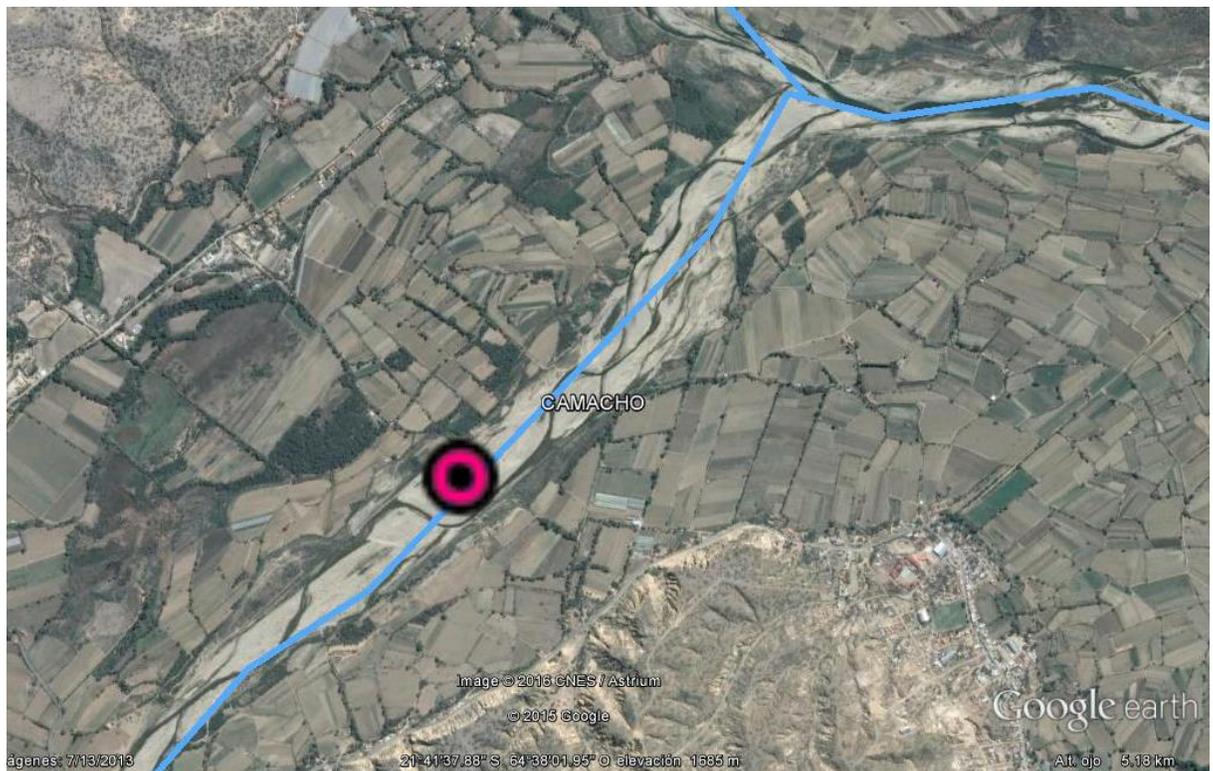


*FOTOGRAFIA 3.3: Ubicación del banco de agregados el Rancho empleado para la investigación*

*FUENTE: google earth*

### **c) Camacho**

La extracción de los agregados del río Camacho se efectuó a 30 Km aproximadamente de la ciudad de Tarija, en el valle de la Concepción, entre 21°42' latitud sur y 64°38' latitud oeste, a este contribuyen los ríos de Chaguaya, Juntas, y Barrancas.



*FOTOGRAFIA 3.4: Ubicación del banco de agregados Camacho empleado para la investigación*

*FUENTE: google earth*

### **3.2.1.2. Características generales de los bancos de materiales.**

#### **a) Temporal**

Los áridos de esta zona son aprovechables por su buena consistencia y homogeneidad, los áridos finos son homogéneos y a simple vista se ve una arena gruesa no muy fina. De acuerdo a la formación geológica en la zona del Temporal, existen depósitos de carácter aluvial, de material suelto, de cantos, gravas, arenas, limos y arcillas producto de la destrucción de rocas de la formación cienaguillas, pertenecientes al periodo ordovícico, formados con lutitas de color gris oscura intercalados con niveles de cuarcitas y areniscas. La cuarcita es una roca dura de textura sacaroide constituida principalmente por granos de cuarzo entrelazados, por lo que su fractura es a través de los granos y no alrededor de ellos; su color es variable blanco, rosado, rojo, negro, etc.



*FOTOGRAFIA 3.5: Yacimiento de agregados el Temporal  
FUENTE: Elaboración propia*

#### **b) Rancho**

En cuanto a las características a simple vista se puede notar que algunas piedras tienen formas lajosas y por la cercanía a la ciudad son muy empleados.

De acuerdo a la formación geológica existe un material semi-consolidado de cantos, gravas, arenas, limos y arcillas de edad cuaternaria producto de la descomposición de las rocas de la formación cienaguillas de edad ordovícica formados por lutitas que son rocas de composición esencialmente arcillosa y una estructura típica a la laminaridad por lo que su característica es la de separarse en láminas o escamas.

#### **c) Camacho**

Los áridos de este río son de canto rodado y es un material aprovechable por su buena consistencia y homogeneidad.

En cuanto a la formación geológica son depósitos de origen fluvial y aluvial, formado por gravas de edad precámbrica, perteneciente a la formación rejara compuesta de metagranudiorita y rocas de la formación cienaguillas compuesta de cuarcitas y lutitas de edad ordovícica.



*FOTOGRAFÍA 3.6: Árido fino – Rio Camacho  
FUENTE: Elaboración propia*

### **3.3. Programa Experimental.**

#### **3.3.1. Cemento.**

El cemento empleado para la investigación es el cemento EL PUENTE el cual cuenta con las siguientes características:

##### **3.3.1.1. Especificaciones Técnicas**

- Norma técnica: Norma Boliviana NB-011
- Tipo de cemento: IP-30
- Presentación: bolsas de 50 Kg.

##### **3.3.1.2. Características**

Producto obtenido de la molienda conjunta de clinker, yeso y puzolana. Desprende menor calor de hidratación, lo que reduce la retracción térmica debido a la inclusión de puzolana.

La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse en casi todo el territorio nacional. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente:

55-70%	de clinker Portland
40-55%	de puzolana
2-4%	de yeso

### 3.3.1.3. Especificaciones Químicas y Físicas

El cemento aprovechado para efectuar la dosificación tiene una fecha de fabricación del mes de marzo de 2015.

Fecha:	Marzo del 2015		Cemento Portland El Puente	Norma Boliviana IP-30
ESPECIFICACIONES QUÍMICAS	PPF	%	3,97	< 7
	SiO <sub>2</sub>	%	28,07	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5,14	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,9	
	CaO	%	51,14	
	MgO	%	2,25	< 6
	SO <sub>3</sub>	%	1,52	< 4
	K <sub>2</sub> O	%	1,65	
	Na <sub>2</sub> O	%	0,35	
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,01	
	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,12	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,21	
	TiO <sub>2</sub>	%	0,27	
	R.I.	%	14,43	
	Cal libre	%	0,74	

TABLA 3.1: Especificaciones químicas del cemento El Puente

FUENTE: Área Técnica del laboratorio de SOBOCE-ELPUENTE

ESP ECIF	BLAINE		cm <sup>2</sup> /g	4839	> 2600
		INICIAL	Min.	182	> 60

	TIEMPO DE FRAGUADO	FINAL	Hrs.	04:49	<12:00
	EXPANSIÓN AUTOCLAVE		%	0,092	<8
	RELACIÓN a/c		ml/g.	0,518	
	FLUIDEZ		%	108	
	RESIDUO EN MALLAS	200 M	%Ret.	0,96	
		325 M	%Ret.	6,27	
	PESO ESPECÍFICO		g/ml	3040	
	RESISTENCIA A COMPRESIÓN	3 DÍAS	Mpa	20,8	> 10
		7 DÍAS	Mpa	26,1	> 17
		28 DÍAS	Mpa	33,2	> 30

*TABLA 3.2: Especificaciones físicas del cemento El Puente  
FUENTE: Área Técnica del laboratorio de SOBOCE-ELPUENTE*

### **3.3.2. Caracterización de los agregados.**

Los ensayos fueron realizados en los ambientes del laboratorio de suelos y hormigones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y de acuerdo a los manuales técnicos, ensayos de suelos y hormigones de la ABC (Administradora Boliviana de Carreteras) (Pérez Droguet, 2007).

#### **3.3.2.1. Granulometría.**

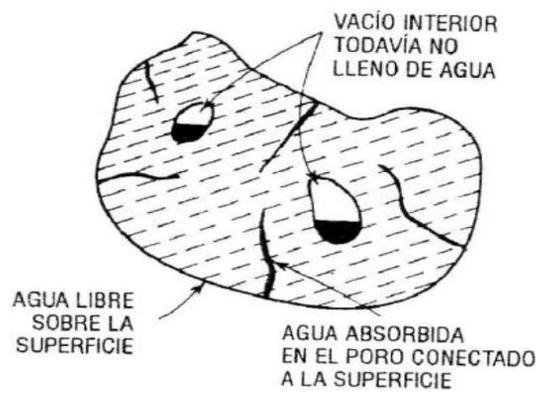
El análisis Granulométrico es la determinación de los tamaños de las partículas de una cantidad de muestra de suelo, y aunque no es de utilidad por sí solo, se emplea junto con otras propiedades del suelo para clasificarlo, a la vez que nos auxilia para la realización de otros ensayos; existen normas que rigen los rangos granulométricos óptimos a utilizar en una mezcla de concreto, por lo tanto en los estudios de agregados es completamente importante regirse en él; **Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM C 136 AASHTO T27).**

Este método de ensayo establece el procedimiento para tamizar y delimitar la granulometría (distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido) (Pérez Droguet, 2007).

#### **3.3.2.2. Peso Específico**

Cuando se examina la aptitud física de los agregados para realizar una dosificación adecuada, es conveniente conocer y valorar las características propias de cada material, entre las cuales podemos nombrar la densidad, el peso específico y la absorción.

Para poder medir las características anteriores es importante entender que todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que posibilita la entrada de agua en los espacios de los poros. Un agregado húmedo puede entonces tener agua tanto en su interior como en el exterior.



*FOTOGRAFÍA 3.7: Determinación de la Densidad Aparente, Densidad Nominal Absorción*  
*FUENTE: "Tecnología del Hormigón" Sincelejo – Facultad de Sucre MARCOS DE LEON.*  
*(Tomado de: Waddell J. y Dobrowolski J., Manual de la Construcción con Concreto, p. 2.20).*

Partícula de agregado húmedo en la que se muestra la distribución de agua interior y exterior.

Se conoce como absorción, al incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca.

### **3.3.2.2.1. Peso Específico del Agregado grueso**

**Método para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción en áridos gruesos (ASTM C 127 AASHTO T85).**

Este método instituye los procedimientos para determinar el peso específico real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos (Pérez Droguet, 2007).

#### **3.3.2.2. Peso Específico del Agregado fino**

**Método para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción en áridos finos (ASTM C 128 AASHTO T84).**

Este método instaure los procedimientos para determinar el peso específico real, el peso específico neto y la absorción de agua de los áridos finos (Pérez Droguet, 2007).

#### **3.3.2.3. Peso Unitario**

**Ensayo para determinar el peso unitario o peso específico aparente (ASTM E 30 ASTM C 29).**

Este método de ensayo establece los procedimientos para delimitar el peso específico de los áridos (Pérez Droguet, 2007).

#### **3.3.3. Diseño de mezclas.**

Con el objeto de conocer las resistencias de las mezclas de hormigón de cada agregado empleado para la investigación y tomando en cuenta parámetros que son de acuerdo al tipo de estructura que afecta al índice de Sorptividad para su resistencia, se efectuó la siguiente dosificación:

##### **3.3.3.1. Principio del método.**

El conocimiento de las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido tiene como finalidad primordial la de determinar el diseño de la mezcla.

Para el proporcionamiento de los ingredientes de una mezcla de hormigón se han sugerido muchos métodos dentro de los cuales se encuentran los analíticos, experimentales, semianalíticos y empíricos. Estos métodos han evolucionado desde los

volumétricos arbitrarios de comienzos del presente siglo, al método de peso y volumen propuesto por ACI.

El método americano ACI es el más conocido y ampliamente usado. Se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams. Consiste en seguir en forma ordenada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en peso y en volumen, para 1 m<sup>3</sup> de concreto.

La misma, no pretende profundizar los principios en que se basa el método, sino mostrar los diferentes pasos que deben seguirse. Y de esta manera lograr una mezcla óptima acorde con las exigencias del aspecto constructivo.

Este informe solo pretende ser un aporte más al conocimiento del hormigón y, específicamente está orientado al estudio de los procedimientos a seguir para la elección de las propiedades de la unidad cubica de concreto por el método de ACI.

### **3.3.3.2. Proceso de Dosificación**

#### **3.3.3.2.1. Procedimiento Teórico**

Para la presente investigación se practicó el método del ACI (American Concrete Institute) que consta, sintéticamente, de los siguientes pasos:

- 1) Selección de la resistencia promedio a partir de la resistencia en compresión especificada.

Se elaboraron mezclas para cada agregado con una misma resistencia de diseño convencional de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

<b>Resistencia de Diseño Cuando no Hay Datos que Permitan Determinar la Desviación Estándar (a)</b>	
<b>Resistencia específica <math>f_{ck}</math> en (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia de diseño de la mezcla <math>f_{cm}</math> en (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Menos de 210 kg/cm<sup>2</sup></b>	$f_{ck} + 70$ kg/cm <sup>2</sup>

<b>De 210 a 350 kg/cm<sup>2</sup></b>	$f_{ck} + 85 \text{ kg/cm}^2$
<b>Más de 350 kg/cm<sup>2</sup></b>	$f_{ck} + 100 \text{ kg/cm}^2$

*TABLA 3.3: Resistencia de Diseño*

*FUENTE: NORMA A.C.I.*

De acuerdo a la tabla 3.3 se obtiene una resistencia característica de 295 Kg/cm<sup>2</sup>.

2) Selección del tamaño máximo de agregado.

Los áridos bien graduados de tamaño máximo tienen menos vacíos que los de tamaños menores. De aquí que los hormigones con áridos de mayor tamaño requieran menos mortero por volumen. Generalmente el tamaño máximo del árido debe ser el mayor que se encuentre disponible económicamente y el que resulte compatible con las dimensiones de la estructura, (Benítez Reynoso, 1998).

De acuerdo al tema de investigación, donde el ensayo ASTM C 1585 SORPTIVIDAD es más usual y se manifiesta en estructuras que están sometidas a la humedad y altas temperaturas como cimentaciones, pavimentos rígidos, canales, presas, etc. Se optó por elegir un tamaño máximo de 1 y ½ pulg.; como estas estructuras generalmente se construyen con tamaños grandes.

<b>Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción</b>				
<b>Dimensión mínima de la sección (cm)</b>	<b>Tamaño máximo en pulg. (cm.)</b>			
	<b>Muros reforzados, vigas y columnas</b>	<b>Muros sin refuerzo</b>	<b>Losas muy reforzadas</b>	<b>Losas sin refuerzo o poco reforzadas</b>
<b>6 – 15</b>	1/2"(1,2) - 3/4"(1,9)	3/4"(1,9)	3/4"(1,9) - 1"(2,5)	3/4"(1,9) - 1 3/4"(3,8)
<b>19 – 29</b>	3/4"(1,9) - 1 1/2"(3,8)	1 1/2"(3,8)	1 1/2"(3,8)	1 1/2"(3,8) - 3"(7,6)
<b>30 – 74</b>	1 1/2"(3,8) - 3"(7,6)	3"(7,6)	1 1/2"(3,8) - 3"(7,6)	3"(7,6)
<b>75 o más</b>	1 1/2"(3,8) - 3"(7,6)	6"(15,2)	1 1/2"(3,8) - 3"(7,6)	3"(7,6) - 6"(15,2)

*TABLA 3.4: Tamaños máximos de Agregados*

*FUENTE: REF. NORMA A.C.I.*

3) Selección del asentamiento.

Si el asentamiento no está definido pueden usarse los valores presentados en la tabla 3.5, que son aplicables cuando se utiliza vibración para compactar el hormigón.

<b>TIPO DE ESTRUCTURA</b>	<b>SLUMP MÁXIMO</b>	<b>SLUMP MÍNIMO</b>
<b>Zapatas y muros de cimentación</b>	3"	1"
<b>Cimentaciones simples y calzaduras</b>	3"	1"
<b>Vigas y muros armados</b>	4"	1"
<b>Columnas</b>	4"	2"
<b>Muros y pavimentos</b>	3"	1"
<b>Concreto ciclópeo</b>	2"	1"

*TABLA 3.5: Asentamientos recomendados para diversos tipos de Estructuras I*

4) Selección del volumen de agua de diseño.

La cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón, requerida para producir un asentamiento dado depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y de la granulometría de los áridos, así como de la cantidad de aire incluido.

Asentamiento	Agua en lt/m <sup>3</sup> , para TNM agregados y consistencia indicadas							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
<b>Concreto sin aire incorporado</b>								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	-
<b>Concreto con aire incorporado</b>								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	187	184	174	166	154	-

*TABLA 3.6: Volumen de agua*

5) Selección de la relación agua-cemento por resistencia.

Los requerimientos de la relación agua-cemento se determinan no sólo por los requerimientos de resistencia sino por factores tales como la durabilidad y propiedades del acabado. Ya que los diferentes agregados producen resistencias distintas con la relación agua-cemento. La resistencia promedio seleccionada debe,

desde luego, exceder a la resistencia especificada (característica) por un margen suficiente, para mantener el número de pruebas de resistencias bajas dentro de los límites especificados, (Benítez Reynoso, 1998).

<b>RESISTENCIA Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Relación a/c en peso</b>	
	Concreto sin Aire incorporado	Concreto con Aire incorporado
<b>150</b>	0,8	0,71
<b>200</b>	0,7	0,61
<b>250</b>	0,62	0,53
<b>300</b>	0,55	0,46
<b>350</b>	0,48	0,4
<b>400</b>	0,43	-
<b>450</b>	0,38	-

*TABLA 3.7: Relación Agua – Cemento por Resistencia*

<b>Correspondencia entre la Resistencia a la Compresión a los 28 Días de Edad y la Relación Agua-Cemento para los Cementos Colombianos, Pórtland Tipo I, en Hormigones sin Aire Incluido</b>			
<b>Resistencia a la compresión Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Relación agua-cemento en peso</b>		
	<b>Límite superior</b>	<b>Línea media</b>	<b>Límite inferior</b>
<b>140</b>	-	0,72	0,65
<b>175</b>	-	0,65	0,58
<b>210</b>	0,7	0,58	0,53
<b>245</b>	0,64	0,53	0,49
<b>280</b>	0,59	0,48	0,45
<b>315</b>	0,54	0,44	0,42
<b>350</b>	0,49	0,40	0,38

*TABLA 3.8: Relación Agua – Cemento*

6) Determinación del contenido de agregado grueso.

Los áridos esencialmente similares en granulometría y en tamaño máximo producirán un hormigón de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplee un volumen precisado de árido grueso y seco, compactado con varilla, por volumen unitario de hormigón. Las diferencias en la cantidad de mortero necesarias para obtener la trabajabilidad con

áridos distintos, debidas a la forma y granulometría de las partículas, quedan compensadas con las diferencias en el concreto de vacíos en el árido seco y compactado con varilla, (Benítez Reynoso, 1998).

<b>Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena (b)</b>					
<b>Tamaño máximo nominal del agregado</b>		<b>Módulo de finura de la arena</b>			
<b>mm.</b>	<b>pulg.</b>	<b>2,40</b>	<b>2,60</b>	<b>2,80</b>	<b>3,00</b>
<b>9,5</b>	3/8"	0,50	0,48	0,46	0,44
<b>12,7</b>	1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
<b>19,0</b>	3/4"	0,66	0,64	0,62	0,60
<b>25,4</b>	1"	0,71	0,69	0,67	0,65
<b>38,1</b>	1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
<b>50,8</b>	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
<b>76,1</b>	3"	0,82	0,80	0,78	0,76
<b>152,0</b>	6"	0,87	0,85	0,83	0,81

*TABLA 3.9: Peso del Agregado Grueso por unidad de volumen del Hormigón*

7) Determinación del contenido de cemento.

La cantidad de cemento por unidad de volumen se obtiene de las determinaciones efectuadas en los pasos 4 y 5. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado (paso 4) dividido entre la relación agua-cemento (paso 5). Si, no obstante, la especificación incluye por separado un límite mínimo de cemento además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en aquel criterio que conduzca a la mayor cantidad de cemento.

8) Determinación de la cantidad del agregado fino.

9) Al concluir el paso 7, se habrán calculado todos los componentes del hormigón, excepto el árido fino. Su cantidad se dispone por medio de las diferencias. Se puede emplear el método por peso o el método de volumen absoluto.

Si el peso de volumen unitario de hormigón se presupone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido del árido fino es simplemente la diferencia entre el peso de hormigón fresco y el peso total de los ingredientes. Por lo general, en base a experiencias anteriores con los materiales se conoce el peso unitario del hormigón con una precisión razonable.

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregado fino se basa en el uso de los volúmenes de los componentes. En este caso, el volumen total de los componentes conocidos (agua, aire, cemento y árido grueso) se resta del volumen unitario de hormigón para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen que cualquier componente ocupa en el hormigón es igual a su peso dividido entre el peso específico de ese material (siendo este último el producto del peso unitario del agua y la densidad del material).

10) Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.

Debe considerarse la humedad de los áridos para pesarlos correctamente. Por lo general, los áridos están húmedos y a su peso seco habrá que aumentarle el porcentaje de agua que contengan, tanto la absorbida como la superficial. El agua de mezclado que se agrega a la mezcla debe reducirse en una cantidad igual a la de la humedad libre que contiene el árido, esto es, humedad total menos absorción.

11) Precisión de la proporción en peso, de diseño y de obra.

#### **3.3.3.2.2. Procedimiento Práctico.**

La elaboración de probetas se desarrolló tomando en cuenta las proporciones de las dosificaciones para obtener resistencias con las características de los agregados.

##### **➤ Proceso**

Para la elaboración de probetas se prepararon todos los equipos y materiales necesarios, se realizó el siguiente procedimiento:

- ✓ Se determinaron los pesos de los agregados del Temporal como también del cemento, para los bancos de Temporal, Rancho y Camacho.
- ✓ Se prepararon los moldes de las siguientes dimensiones (0,15m\*0,30 m) y (0,10m\*0,20 m) resistentes como para soportar las condiciones del trabajo de moldeado, el equipo para efectuar el mezclado (mezcladora); se limpiaron los moldes con aceite para desmoldar fácilmente las probetas.



*FOTOGRAFÍA 3.8: Moldes para la elaboración de probetas  
FUENTE: Elaboración propia.*

- ✓ Para realizar el mezclado se hizo funcionar la mezcladora, seguidamente se derramó un poco de agua dentro de la mezcladora, para luego echar los agregados y el cemento de poco a poco y terminar tirando toda el agua según lo que se había obtenido en el diseño de mezclas y según sea lo necesario de acuerdo a la humedad y las condiciones en que se encontraban los agregados.



*FOTOGRAFÍA 3.9: Mezcla de hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Se verificó el asentamiento para ver la trabajabilidad del hormigón; colocando tres capas la masa de hormigón al cono de Abrams y apisonando con la varilla veinticinco golpes en cada capa, se enrazó al cono con la varilla y se retiró el mismo para lograr medir el asentamiento.



*FOTOGRAFÍA 3.10: Verificación del asentamiento de la masa de hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

✓ Después de constatar el asentamiento se llenaron los moldes en tres capas:

**Primera Capa:**

Colocada la mezcla en el molde mezclamos con el cucharón para que esté bien distribuida y pareja.

Compactar la primera capa en todo su espesor, mediante 25 inserciones ("chuzeadas") con la varilla lisa, distribuidas de manera uniforme en la mezcla. El extremo redondeado de la varilla va hacia abajo.

Una vez culminada la compactación de esta capa, golpeamos suavemente alrededor del molde unas 10 veces con el martillo para liberar las burbujas de aire que hayan podido quedar atrapadas en el interior de la mezcla.

**Segunda Capa:**

Colocamos la mezcla en el molde y distribuimos de manera uniforme con el cucharón. Compactamos con 25 "chuzeadas" con la varilla lisa. La varilla debe ingresar 1 pulgada en la primera capa.

Luego golpear suavemente alrededor del molde unas 10 veces con el martillo para liberar las burbujas de aire.

**Tercera Capa:**

En esta última capa, agregar suficiente cantidad de mezcla para que el molde quede lleno.

Compactar esta tercera capa también mediante 25 "chuzeadas" con la varilla lisa, teniendo cuidado que estén uniformes y distribuidas en toda la masa recién colocada. Culminada la compactación, golpeamos suavemente alrededor del molde unas 10 veces con el martillo para liberar las burbujas de aire de la mezcla. Nivelar el exceso de mezcla con la varilla lisa de compactación.



*FOTOGRAFÍA 3.11: Compactado con la varilla la mezcla de hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Dar un buen acabado con la plancha para obtener una superficie lisa y plana.



*FOTOGRAFÍA 3.12: Moldes cilíndricos con mezcla de hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Después de su elaboración, las probetas fueron transportadas con mucho cuidado al lugar de almacenamiento.
- ✓ Las probetas se desmoldaron 24 horas después, hecho esto se marcarán en la cara circular de la probeta su identificación del molde.



*FOTOGRAFÍA 3.13: Probetas desmoldadas de hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

#### **3.3.3.3. Curado de las Probetas**

Para la realización del ensayo curado en el laboratorio de muestras de hormigón para ensayos de compresión y flexión se utilizó el procedimiento de la norma (**ASTM C 39 AASHTOT22**) (Pérez Droguet, 2007), detallándose lo siguiente:

Después de desmoldar las probetas y antes de que transcurran 30 minutos después de haber removido los moldes, se almaceno las probetas en condiciones adecuadas de humedad, siempre cubiertas por agua a una temperatura de entre 23 y 25°C. (Protección, humedad, temperatura, etc).

#### **3.3.3.4. Rotura de las Probetas**

Para la realización del ensayo de rotura de probetas a la compresión se utilizó el procedimiento de la norma (**ASTM C 39 AASHTOT22**) detallándose en los siguientes pasos.



*FOTOGRAFÍA 3.14: Probetas inmediatamente después del curado*  
*FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Limpiar la superficie de las placas de la prensa.



*FOTOGRAFÍA 3.15: Prensa para rotura de probetas.*  
*FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Limpiar las caras de ensayo de la probeta.
- ✓ Colocar la probeta sobre la placa inferior de la prensa alineando su eje central con el centro de la prensa.
- ✓ Asentar la placa superior de la prensa sobre la probeta, guiándola suavemente con la mano para obtener un apoyo de la placa lo más uniforme posible.
- ✓ Aplicar la carga en forma continua y sin choques, a una velocidad uniforme.
- ✓ Registrar la carga máxima P, expresada en N.

### **-CÁLCULOS**

Para el cálculo de la resistencia a compresión simple soportada por probeta, utilizando la siguiente expresión:

$$R = \frac{P}{A} \quad (3.1.)$$

#### **Donde:**

R= Resistencia a la compresión simple, (kg/cm<sup>2</sup>)

P= Carga máxima soportada por el espécimen (kg)

A= Área promedio de la sección transversal del espécimen (cm<sup>2</sup>)



*FOTOGRAFÍA 3.16: Fisuras de rotura de probeta a los 7 días cantera el Rancho.  
FUENTE: Elaboración propia*

Resistencias adquiridas del diseño de mezclas a la edad de 28 días según las proporciones determinadas y las características de los agregados:



*FOTOGRAFÍA 3.17: Fisuras de rotura de probeta a los 28 días de la cantera de Camacho  
FUENTE: Elaboración propia*



*FOTOGRAFÍA 3.18: Probetas sometidas a rotura a los 28 días; Temporal, Rancho y Camacho*

*FUENTE: Elaboración propia*

#### **-NÚMERO DE MUESTRAS.**

Para la investigación se tomaron 3 bancos de materiales en cuanto a los agregados, para cada banco se realizará la rotura de probetas a los 7 y 28 días de edad, a los 7 días se romperán 10 probetas y a los 28 días se romperán 10 probetas, haciendo un total de 60 probetas sometidas a rotura a la compresión simple, si la estadística nos dice que el

número de muestras ideal para un trabajo de investigación es de 30 muestras en el trabajo se presentan diferentes limitaciones:

- ✓ Al usar tres bancos de materiales para realizar 30 muestras por cada una de ellas el tiempo para confeccionarlas que se necesita es largo y el que se disponía era muy limitado.
- ✓ Los equipos para su realización eran limitados, porque en ese momento otros estudiantes también lo estaban utilizando (moldes).
- ✓ Si bien la estadística requiere de ese número de muestra también este mismo puede variar dependiendo a la desviación estándar que presenten el número de muestras de acorde a sus requerimientos, en este estudio los valores que se obtuvieron para la resistencia eran coherentes y no muy dispersos de acuerdo a la teoría utilizada, también al obtener resistencia a los 7 días en laboratorio estas pueden ser proyectadas para los 28 días lo cual nos sirve para tener más muestra.
- ✓ De acuerdo al número de muestras utilizadas para la resistencia teorías nos muestran la ventaja que tiene utilizar de una misma mezcla para todas las muestras estudiadas, por lo cual se realizó una mezcla para cada banco, extrayendo de ahí para las roturas de probetas 7 días, 28 días y para las 6 muestras sometidas a la Medida del índice de absorción de agua en el hormigón.
- ✓ Según estudios realizados en hormigones empleados en la construcción recomiendan utilizar por cada 50 metros cúbicos 3 muestras.
- ✓ El número de muestras utilizadas para el ensayo del Índice de Absorción de agua en el hormigón. La norma ASTM C1585 en nota 5 nos dice que es suficiente con dos muestras, en este estudio se ensayaron 6 muestras para cada banco, se ensayó este número de muestras por la limitante del equipamiento, reactivos en el laboratorio y por el tema económico.

### **3.3.4. Ensayo ASTM C 1585.**

Anteriormente en el subtítulo elaboración de probetas ya se realiza una descripción del procedimiento del Método ACI 211, ahora se realizará el procedimiento del Ensayo ASTM C1585 el experimento consta de:

#### **MEDIDA DEL ÍNDICE DE ABSORCIÓN DE AGUA EN EL HORMIGÓN.**

##### **➤ Alcance**

Este método de ensayo es utilizado para determinar el índice de absorción del agua por el concreto, el aumento en la masa de un espécimen resultado de la absorción del agua en función del tiempo en que solamente una superficie del espécimen se expone al agua, la superficie expuesta del espécimen se sumerge en el agua del concreto no saturado dominado por la succión o absorción capilar durante el contacto inicial con el agua.

##### **➤ Significado y Uso**

El funcionamiento del concreto sujeto a muchos ambientes agresivos es función, en gran parte, de la penetración del sistema de poro. En concreto no saturado, el índice del ingreso de agua u otros líquidos es controlado en gran parte por la absorción debido a la succión. Este ensayo se basa en el desarrollado por Hall que llamo al fenómeno sorptividad al agua.

Este método tiene la intención determinar la susceptibilidad de un concreto no saturado a la penetración de agua. El índice de absorción del concreto en la diferencia generalmente del índice de la absorción de una muestra tomada del interior. La superficie exterior está sujeta a curado menos del previsto y se expone a menudo a las condiciones potencialmente más adversa. Este método de ensayo se utiliza para medir el índice de la absorción de agua de la superficie concreta y del concreto interno. Cortándola transversalmente en las profundidades seleccionadas, la absorción se puede evaluar en diversas distancias de la superficie expuesta.

##### **➤ Equipo, Materiales y Reactivos.**

Entre los equipos que se emplea para la determinación del índice de absorción de agua en el concreto son:

- ✓ Recipiente de aluminio resistente a la corrosión dimensiones (60\*45\*5) cm, bastante grande para acomodar los especímenes de la prueba con las superficies que se probaran expuestas al agua.
- ✓ Soporte barras de fierro corrugado resistentes a la corrosión, permiten el acceso libre de agua a la superficie expuesta del espécimen durante la prueba (Evitando el menor contacto entre los especímenes y el soporte).
- ✓ Balanza, con la suficiente capacidad para los especímenes de la prueba y exactitud por lo menos de  $\pm 0,01$  g.
- ✓ Cronómetro conveniente para la sincronización con exactitud de  $\pm 1$ s.
- ✓ Toalla de paño, para limpiar exceso de agua de superficies del espécimen.
- ✓ Un horno capaz de mantener una temperatura de  $50 \pm 2$  ° C.
- ✓ Contenedores de Envases de polietileno. Con las tapas sellables, bastante grandes para contener por lo menos un espécimen de la prueba, pero no más grande que 5 veces el volumen del espécimen.
- ✓ Pie de rey y micrómetro, para medir las dimensiones del espécimen a los 0,1 milímetros más cercanos.

Entre los materiales necesarios para el ensayo son los siguientes:

- ✓ Pintura epoxica, el material no requerirá un curado más de 10 minutos.
- ✓ Bolsa de plástica, cualquier bolsa de plástico o cubrimiento que se podría unir al espécimen para el control de la evaporación de la superficie no expuesta al agua. Una venda elástica se requiere para mantener la bolsa o cobertor en el lugar durante las medidas.

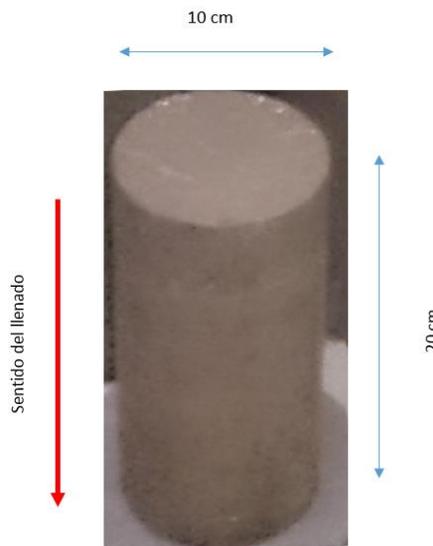
Entre los reactivos necesarios para el ensayo son los siguientes:

- ✓ Bromuro de potasio.
- **Especímenes.**

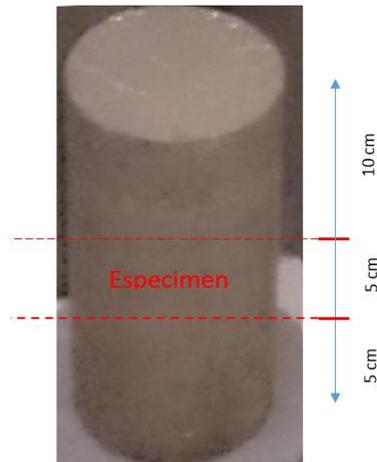
Los especímenes estándar para la prueba son resultado de corte transversal de probetas de (10\*20) cm, Una vez finalizado el curado de las probetas, se realizó el aserrado de las probetas de la siguiente manera:

Se efectuó un primer corte a 5 cm de la base de la probeta, el siguiente corte se realizó nuevamente a los 5 cm lo que queda entre el primer y segundo corte ese llega hacer el espécimen para la prueba de esta manera se obtuvo una superficie plana y lisa. Con la mitad restante, se realizaron un tercer y cuarto aserrado de 5 cm cada uno, este proceso de aserrado se realiza con una amoladora con disco de diamante en el momento del corte se va roseando con un poco de agua llegando a formar un disco de  $100 \pm 6$  milímetros de diámetro, con una longitud de  $50 \pm 3$  milímetros.

NOTA 1.- La superficie que se expondrá durante la prueba no será marcada ni será interferida de otra manera de una forma tal como puede modificar el índice de la absorción del espécimen.



*FIGURA 3.1: Aserrado de probetas para el ensayo de Sorptividad  
FUENTE: Elaboración propia*



*FIGURA 3.2: Espécimen para el ensayo de Sorptividad  
FUENTE: Elaboración propia*

➤ **PROCEDIMIENTO.**

Acondicionamiento de las Muestras.

- ✓ Coloque los especímenes del ensayo dentro de un horno a una temperatura de  $50 \pm 2^\circ\text{C}$  por 3 días. Controle la humedad relativa en el horno con una solución saturada del bromuro del potasio, pero no permita que los especímenes de la prueba entren en contacto con la solución.

NOTA 3 Para controlar la humedad relativa HR usando la solución del bromuro del potasio, la solución debe ser colocada en el fondo del desecador, para asegurar la superficie más grande de la evaporación posible.

- ✓ Después de los 3 días, ponga cada espécimen dentro de un envase sellable, utilizando un envase separado para cada espécimen. Las precauciones se deben tomar para permitir el flujo libre de aire alrededor del espécimen asegurando el contacto mínimo del espécimen con las paredes del envase.



*FOTOGRAFÍA 3.19: Muestras dentro de un envase sellado; Temporal, Rancho y Camacho  
FUENTE: Elaboración propia*

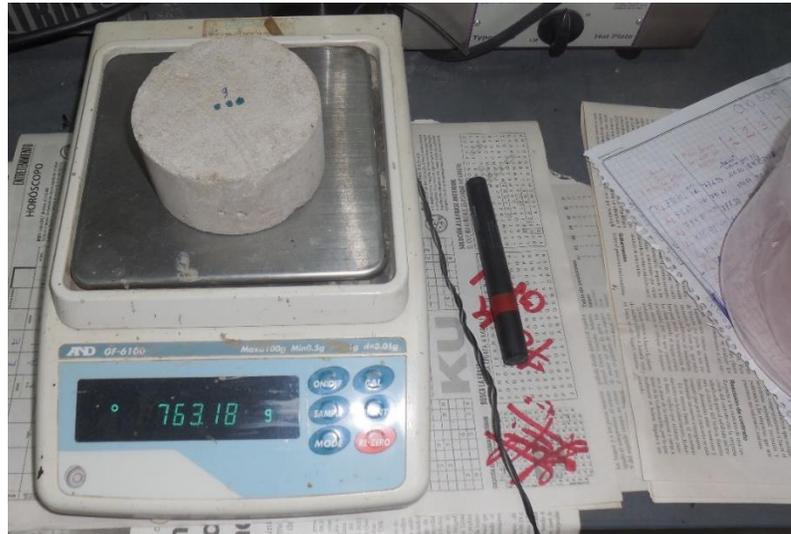
- ✓ Almacene el envase en  $23 \pm 2$  °C por lo menos 15 días antes del comienzo del procedimiento de la absorción.

NOTA 4-Almacene el envase sellado por lo menos 15 resultados de los días en el equilibrio de la distribución de la humedad dentro de los especímenes de la prueba y ha sido encontrado para proporcionar humedades relativas internas de 50% al 70%. Este es similar a las humedades relativas que se encuentran cerca de la superficie en un cierto campo.



*FOTOGRAFÍA 3.20: Peso de la muestra dentro de un envase sellado  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Quite el espécimen del envase del almacenaje y registre la masa del espécimen condicionado a los 0,01 g más cercano y calcule el diámetro medio a los 0,1 milímetros más cercano.



*FOTOGRAFÍA 3.21: Peso de la muestra después de sacar del envase sellado  
FUENTE: Elaboración propia*



*FOTOGRAFÍA 3.22: Medición del diámetro del espécimen  
FUENTE: Elaboración propia*

Selle la superficie lateral de cada espécimen con pintura epóxica recuplast piscina, sellar el extremo de la muestra que no será expuesto al agua usando una hoja plástica libremente unida. La hoja plástica se puede asegurar usando la venda elástica o el otro sistema equivalente.



*FOTOGRAFÍA 3.23: Sellado con pintura epóxica recuplast piscina alrededor del espécimen  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Utilice el procedimiento abajo para determinar la absorción de agua en función del tiempo. Conduzca el procedimiento de la absorción en  $23 \pm 2$  ° C con el agua acondicionada a la misma temperatura.

➤ PROCEDIMIENTO

Medición Índice de Absorción.

- ✓ Mida la masa del espécimen sellado a los 0,01g más cercano y regístrela como la masa inicial para los cálculos de la absorción del agua.



*FOTOGRAFÍA 3.24: Peso del espécimen al inicio del ensayo de Sorptividad*  
*FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Ponga el soporte en el fondo del envase de aluminio y llénelo de agua de modo que el nivel sea 1 a 3 milímetros sobre el soporte. Mantenga el nivel del agua 1 a 3 milímetros sobre el dispositivo de soporte durante las pruebas.
- ✓ Ponga inmediatamente la superficie del espécimen en el soporte. Registre la hora y la fecha del contacto inicial con agua.
- ✓ Registre la masa según los intervalos mostrados en la tabla 4.6.
- ✓ Por cada determinación de la masa, quite el espécimen del envase de aluminio, pare el cronómetro si el tiempo del contacto es menos de 10 minutos, y limpie la superficie del espécimen del agua con una toalla de papel o un paño humedecido. Después de esto, invierta el espécimen de modo que la superficie mojada no entre en contacto con la balanza. Dentro de los 15 segundos siguientes del retiro del espécimen del envase, mida la masa a los 0,01 g más cercano.
- ✓ Sustituya inmediatamente el espécimen los soportes de ayuda y recomience el cronómetro.
- **Cálculos**
- ✓ La absorción,  $I$  es el cambio en la masa dividida por el producto del área seccionada transversalmente del espécimen y de la densidad del agua. Para el

fin de la muestra de dependencia de la temperatura de la densidad del agua se desprecia y un valor de 0,001 g/mm<sup>3</sup> se utiliza. Las unidades de IA son:

$$IA = \frac{mt}{a * d} \quad (3.2.)$$

**Donde:**

IA = la absorción,

mt = el cambio en la masa del espécimen en gramos, en el momento t,

a = el área expuesta de la muestra, en mm<sup>2</sup>, y

d = la densidad del agua en g/mm<sup>3</sup>.

- ✓ El índice inicial de absorción de agua (mm / s<sup>1/2</sup>) se define como la pendiente de la línea que es la mejor aproximación contra la raíz cuadrada de tiempo (s<sup>1/2</sup>). Obtenga está pendiente usando utilizando regresión lineal mínimos cuadrados de la gráfica de I contra tiempo<sup>1/2</sup>. Para el análisis de regresión use todos los puntos a partir de 1min a 6 h, excluyendo puntos en que la gráfica muestre un cambio claro de pendiente. Si los datos entre 1 minuto y 6h no siguen una relación lineal (un coeficiente de correlación de menos que 0,98) y muestran una curvatura sistemática, la tasa secundaria de absorción de agua no puede ser determinada.
- ✓ La tasa secundaria de absorción de agua (mm/s<sup>1/2</sup>) se define como la pendiente de la línea que se aproxime a la gráfica de I contra la raíz cuadrada de tiempo (s<sup>1/2</sup>). Usando todos los puntos de 1 día a 6 días. Emplear regresión lineal mínimos cuadrados para determinar la pendiente. Si los datos entre 1día y 6 días no siguen una relación lineal (un coeficiente de correlación de menos que 0,98) y muestran una curvatura sistemática, la tasa secundaria de absorción de agua no puede ser determinada.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

En lo que sigue, del presente capítulo se presentan los resultados del trabajo de investigación realizado, tanto de la parte experimental como de la parte teórica, reflejada fundamentalmente en los modelos de regresión obtenidos, que expresan y explican la relación entre las diferentes variables consideradas en el estudio.

#### 4.1. Dosificación.

La tabla 4.1, presenta las dosificaciones obtenidas según la norma ACI.

CANTERA	CEMENTO	ARENA	GRAVA
TEMPORAL	1,000	2,039	3,591
RANCHO	1,000	1,843	3,636
CAMACHO	1,000	1,978	3,687

*TABLA 4.1: Proporciones de mezcla  
FUENTE: Elaboración propia*

#### 4.2. Resistencia Probetas.

Resistencias adquiridas del diseño de mezclas a la edad de 7 días según las proporciones determinadas y las características de los agregados se presenta en la tabla 4.2.

<b>RESISTENCIA A LOS 7 DÍAS</b>			
<b>Nº</b>	<b>TEMPORAL (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>RANCHO (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>CAMACHO (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	138,31	133,28	139,68
2	135,15	134,73	147,64
3	142,39	135,04	142,09
4	141,68	132,13	143,40
5	142,80	134,00	146,53
6	133,11	132,03	140,88
7	142,19	133,48	139,27
8	137,90	132,65	140,68
9	132,60	131,92	143,10
10	139,23	133,28	141,69
<b>Media</b>	<b>138,49</b>	<b>133,25</b>	<b>142,47</b>
<b>Maximo</b>	<b>142,80</b>	<b>135,04</b>	<b>147,64</b>
<b>Minima</b>	<b>132,60</b>	<b>131,92</b>	<b>139,27</b>

*TABLA 4.2: Resistencia a los 7 días del hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

<b>RESISTENCIAS PROMEDIO A LOS 7 DÍAS</b>	
<b>CANTERA</b>	<b>RESISTENCIA (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>TEMPORAL</b>	138,94

<b>RANCHO</b>	133,25
<b>CAMACHO</b>	142,47

*TABLA 4.3: Resistencia promedio a los 7 días del hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

La tabla 4.4, presenta resistencias adquiridas del diseño de mezclas mediante la rotura de probetas a la edad de 28 días según las proporciones determinadas y las características de los agregados.

<b>RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS</b>			
	<b>TEMPORAL (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>RANCHO (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>CAMACHO (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	213,69	211,65	214,00
<b>2</b>	214,40	210,94	215,12
<b>3</b>	213,38	212,36	211,04
<b>4</b>	213,08	210,12	214,71
<b>5</b>	212,16	212,06	215,42
<b>6</b>	210,63	211,96	216,75
<b>7</b>	212,06	212,36	213,69
<b>8</b>	213,49	211,55	216,24
<b>9</b>	214,71	213,18	216,55
<b>10</b>	213,89	208,59	215,22

<b>Media</b>	<b>213,15</b>	<b>211,47</b>	<b>214,87</b>
<b>Maximo</b>	<b>214,71</b>	<b>213,18</b>	<b>216,75</b>
<b>Mínimo</b>	<b>210,63</b>	<b>208,59</b>	<b>211,04</b>

*TABLA 4.4: Resistencia a los 28 días del hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

<b>RESISTENCIAS PROMEDIO A LOS 28 DIAS</b>	
<b>CANTERA</b>	<b>RESISTENCIA (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>TEMPORAL</b>	213,15
<b>RANCHO</b>	211,47
<b>CAMACHO</b>	214,87

*TABLA 4.5:  
a los 28 días del  
FUENTE: Elaboración*

*Resistencia Promedio  
Hormigón  
propia*

### **4.3. Absorción.**

#### **4.3.1. Absorción – Tiempo.**

Los ensayos referidos al índice de absorción, realizados en los especímenes de hormigón elaborados con áridos de los bancos utilizados, están presentados en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8. Por su parte las curvas correspondientes al Índice de Absorción versus Tiempo, se presentan en las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3.

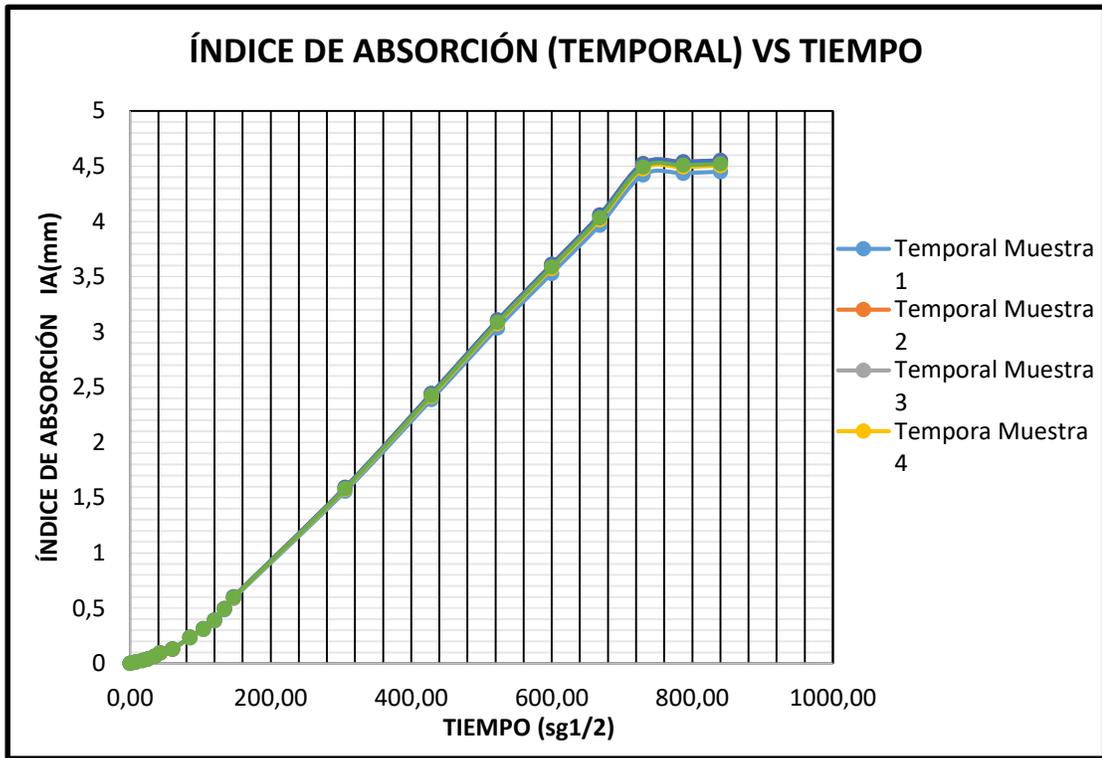
#### **a) Temporal**

#### **-Índice de Absorción**

<b>INDICE DE ABSORCION TEMPORAL</b>						
<b>TIEMPO</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>
<b>MINUTOS</b>	<b>IA (mm)</b>					
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

1,0000	0,0128	0,0131	0,0130	0,0129	0,0130	0,0130
5,0000	0,0255	0,0261	0,0260	0,0258	0,0261	0,0259
10,0000	0,0383	0,0392	0,0390	0,0387	0,0391	0,0389
20,0000	0,0638	0,0653	0,0651	0,0646	0,0652	0,0648
30,0000	0,0931	0,0953	0,0950	0,0943	0,0953	0,0946
60,0000	0,1288	0,1318	0,1314	0,1304	0,1318	0,1309
120,0000	0,2309	0,2362	0,2356	0,2338	0,2362	0,2347
180,0000	0,3074	0,3145	0,3137	0,3113	0,3145	0,3124
240,0000	0,3839	0,3928	0,3917	0,3887	0,3928	0,3902
300,0000	0,4860	0,4973	0,4959	0,4921	0,4972	0,4940
360,0000	0,5880	0,6017	0,6000	0,5954	0,6016	0,5977
1560,0000	1,557424	1,593583	1,589075	1,576935	1,59326	1,582987
3060,0000	2,386519	2,441928	2,43502	2,416417	2,441433	2,425692
4560,0000	3,03704	3,107552	3,098761	3,075087	3,106923	3,08689
6000,0000	3,529396	3,611338	3,601122	3,573611	3,610607	3,587327
7440,0000	3,965627	4,057698	4,046219	4,015307	4,056876	4,030719
8880,0000	4,420992	4,523635	4,510838	4,476377	4,522719	4,493558
10320,0000	4,436299	4,539297	4,526456	4,491875	4,538378	4,509116
11760,0000	4,449054	4,552348	4,53947	4,50479	4,551427	4,52208

*TABLA 4.6: Índice de Absorción final (Temporal)  
FUENTE: Elaboración propia*



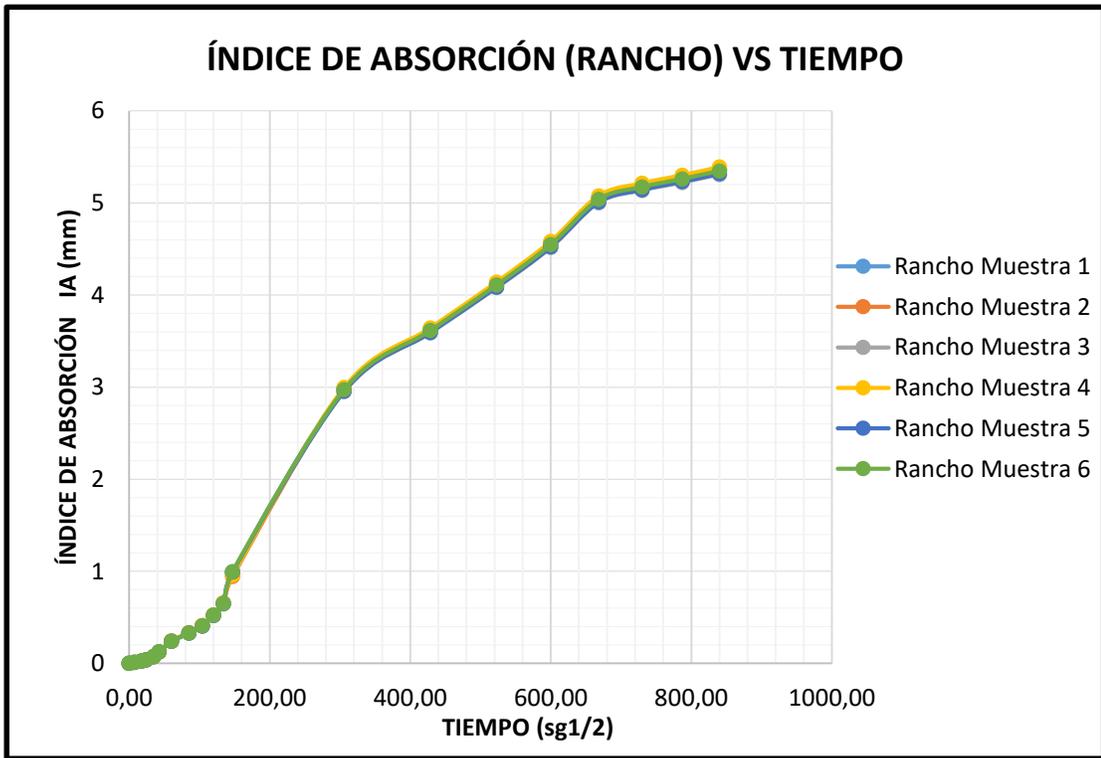
*GRÁFICA 4.1: Índice de Absorción (Temporal) vs Tiempo*  
*FUENTE: Elaboración propia.*

**b) Rancho****-Índice de Absorción**

<b>ÍNDICE DE ABSORCIÓN RANCHO</b>						
<b>TIEMPO</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>
<b>MINUTOS</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>
0,0000	0	0	0	0	0	0
1,0000	0,01288 4	0,01284 8	0,01273 5	0,01292 8	0,01275 5	0,01282 5
5,0000	0,02576 8	0,02569 5	0,02547	0,02585 6	0,02551 1	0,02564 9
10,0000	0,03865 2	0,03854 3	0,03820 5	0,03878 4	0,03826 6	0,03847 4
20,0000	0,07472 7	0,07451 7	0,07386 2	0,07498 3	0,07398 1	0,07438 2
30,0000	0,12626 3	0,12590 8	0,12480 2	0,12669 6	0,12500 2	0,12568
60,0000	0,24221 8	0,24153 7	0,23941 6	0,24304 9	0,2398	0,24110 1
120,0000	0,33240 6	0,33147 2	0,32856 1	0,33354 6	0,32908 7	0,33087 3
180,0000	0,40971	0,40855 8	0,40497	0,41111 4	0,40561 9	0,40782
240,0000	0,52566 5	0,52418 8	0,51958 4	0,52746 8	0,52041 7	0,52324 1
300,0000	0,65450 5	0,65266 5	0,64693 4	0,65674 9	0,64797	0,65148 6

360,0000	0,98948 7	0,94302 4	0,98568 2	0,95668 1	0,99108 8	0,99646 6
1560,0000	2,98649 9	2,97810 5	2,95195 3	2,99674	2,95668 2	2,97272 7
3060,0000	3,63069 6	3,62049 2	3,58869 8	3,64314 6	3,59444 8	3,61395 4
4560,0000	4,12801 7	4,11641 4	4,08026 6	4,14217 2	4,08680 3	4,10898 1
6000,0000	4,56864 8	4,55580 7	4,5158	4,58431 4	4,52303 5	4,54758 1
7440,0000	5,06081 5	5,04659	5,00227 4	5,07816 8	5,01028 8	5,03747 8
8880,0000	5,19609 6	5,18149 2	5,13599	5,21391 3	5,14421 9	5,17213 5
10320,0000	5,28370 7	5,26885 6	5,22258 8	5,30182 5	5,23095 5	5,25934 2
11760,0000	5,37131 8	5,35622 1	5,30918 5	5,38973 6	5,31769 1	5,34654 9

*TABLA 4.7: Índice de Absorción final (Rancho)  
FUENTE: Elaboración propia*



*GRÁFICA 4.2: Índice de Absorción (Rancho) vs Tiempo*  
*FUENTE: Elaboración propia.*

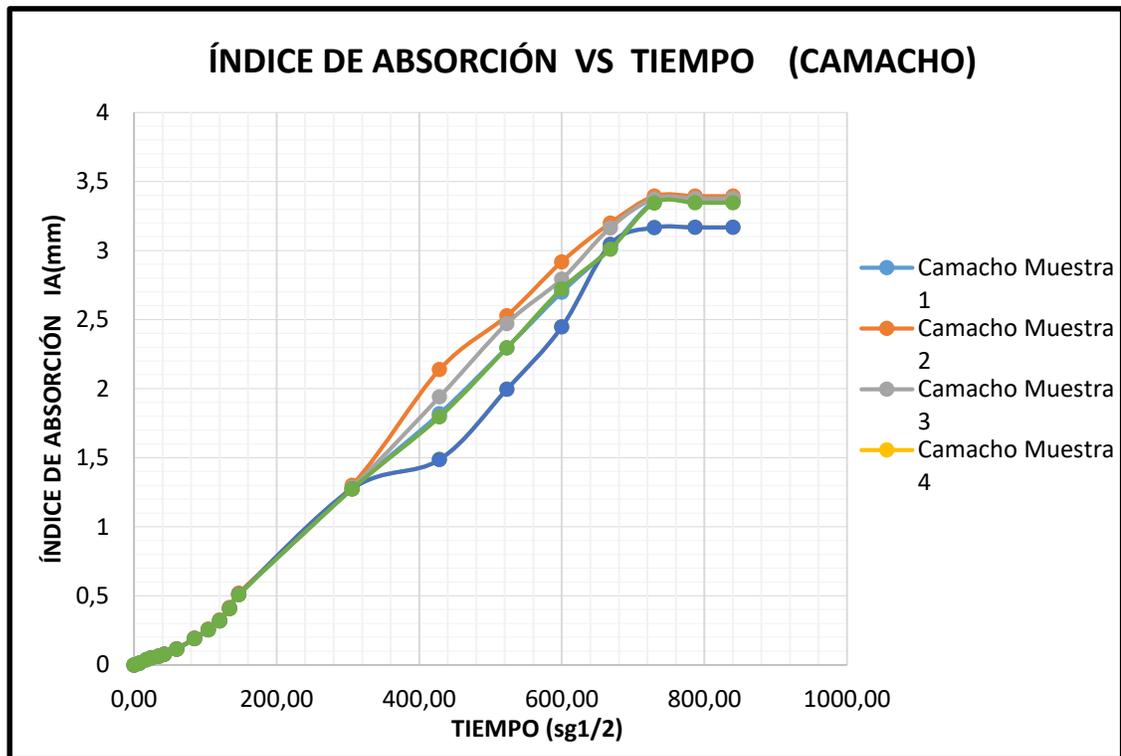
c) Camacho

-Índice de Absorción

ÍNDICE DE ABSORCIÓN CAMACHO						
TIEMPO	C1	C2	C3	C4	C5	C6
MINUTOS	IA (mm)					
0,0000	0	0	0	0	0	0
1,0000	0,012766	0,013007	0,01284	0,012735	0,012758	0,01273
5,0000	0,038297	0,03902	0,03852	0,038205	0,038274	0,038189
10,0000	0,051062	0,052027	0,05136	0,05094	0,051031	0,050919
20,0000	0,063828	0,065033	0,0642	0,063675	0,063789	0,063649
30,0000	0,076593	0,07804	0,07704	0,076409	0,076547	0,076379
60,0000	0,11489	0,11706	0,11556	0,114614	0,114821	0,114568
120,0000	0,191483	0,1951	0,1926	0,191024	0,191368	0,190947
180,0000	0,255311	0,260133	0,2568	0,254698	0,255157	0,254596
240,0000	0,319138	0,325166	0,321	0,318373	0,318947	0,318245
300,0000	0,408497	0,416213	0,41088	0,407517	0,408252	0,407354
360,0000	0,510621	0,520266	0,5136	0,509397	0,510315	0,509193
1560,0000	1,276553	1,300665	1,284	1,146142	1,275787	1,272982
3060,0000	1,817812	2,138292	1,940123	1,687376	1,486292	1,794905
4560,0000	2,29652	2,528492	2,471699	2,209507	1,996606	2,295186
6000,0000	2,698634	2,918691	2,792699	2,457838	2,446959	2,721635
7440,0000	3,017772	3,198334	3,165059	2,9545	3,045303	3,009329
8880,0000	3,353506	3,393434	3,374351	3,117507	3,166503	3,344124

10320,0000	3,354782	3,393434	3,375635	3,11878	3,167779	3,345397
11760,0000	3,354782	3,393434	3,375635	3,11878	3,167779	3,345397

*TABLA 4.8: Índice de Absorción final (Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*



*GRÁFICA 4.3: Índice de Absorción (Camacho) vs Tiempo  
FUENTE: Elaboración propia.*

### 4.3.1. Absorción Promedio – Tiempo.

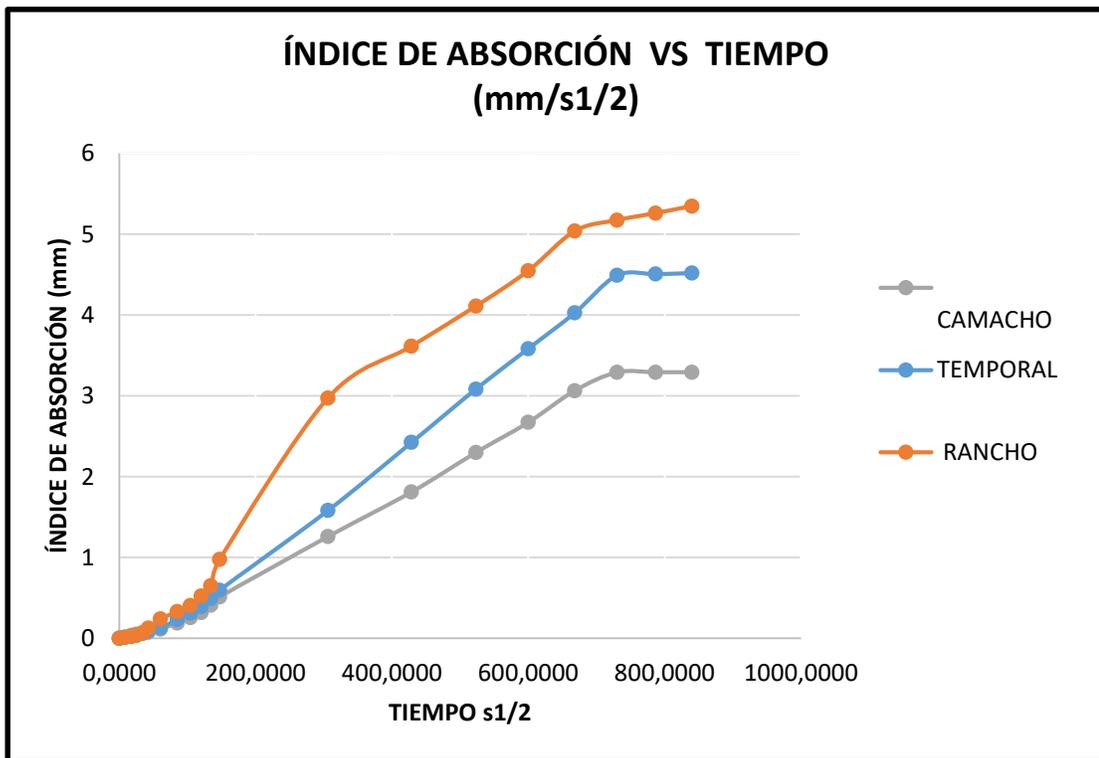
De los ensayos referidos al índice de absorción, realizados en los especímenes de hormigón elaborados con áridos del banco de Temporal, Rancho y Camacho se los promedia a cada banco y se presentan esos valores en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8.

Por su parte las curvas correspondientes al Índice de Absorción versus Tiempo, se presentan en las gráficas 4.4, 4.5 y 4.6, estas se realizan para ver como varían los resultados entre los bancos.

<b>INDICE DE ABSORCION TOTAL PROMEDIO (mm)</b>			
<b>TIEMPO</b>	<b>TEMPORAL</b>	<b>RANCHO</b>	<b>CAMACHO</b>
<b>s<sup>1/2</sup></b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>
0	0,00000	0	0
7,746	0,01295	0,01283	0,01281
17,321	0,02591	0,02566	0,03842
24,495	0,03888	0,03849	0,05122
34,641	0,06479	0,07441	0,06403
42,426	0,09460	0,12573	0,07683
60	0,13088	0,24119	0,11525
84,853	0,23455	0,33099	0,19209
103,923	0,31229	0,40797	0,25612
120	0,39004	0,52343	0,32014
134,164	0,49371	0,65172	0,40979
146,969	0,59738	0,97707	0,51223
305,941	1,582211	2,97378	1,25935
428,486	2,424501	3,61524	1,8108
523,068	3,085376	4,11044	2,29967

600	3,585567	4,5492	2,67274
668,132	4,028741	5,03927	3,06505
729,932	4,491353	5,17397	3,29157
786,893	4,506903	5,26121	3,29263
840	4,519862	5,34845	3,29263

*TABLA 4.9: Índice de Absorción Promedio (Temporal – Rancho – Camacho)*  
*FUENTE: Elaboración propia*

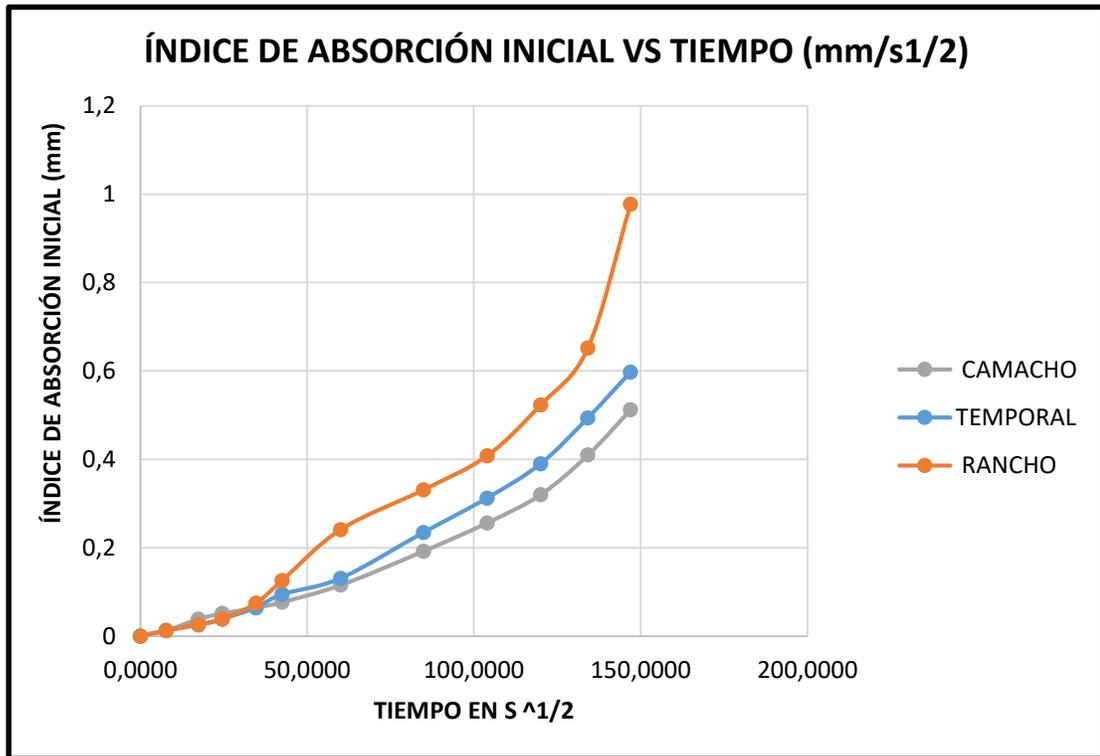


*GRÁFICA 4.4: Índice de Absorción Promedio (Temporal – Rancho - Camacho) vs Tiempo*  
*FUENTE: Elaboración propia.*

<b>ÍNDICE DE ABSORCIÓN INICIAL PROMEDIO (mm)</b>			
<b>TIEMPO</b>	<b>TEMPORAL</b>	<b>RANCHO</b>	<b>CAMACHO</b>

<b>min</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>	<b>IA (mm)</b>
0,0000	0,00000	0	0
1,0000	0,01295	0,01283	0,01281
5,0000	0,02591	0,02566	0,03842
10,0000	0,03888	0,03849	0,05122
20,0000	0,06479	0,07441	0,06403
30,0000	0,09460	0,12573	0,07683
60,0000	0,13088	0,24119	0,11525
120,0000	0,23455	0,33099	0,19209
180,0000	0,31229	0,40797	0,25612
240,0000	0,39004	0,52343	0,32014
300,0000	0,49371	0,65172	0,40979
360,0000	0,59738	0,97707	0,51223

*TABLA 4.10: Índice de Absorción Inicial Promedio (Temporal – Rancho – Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*

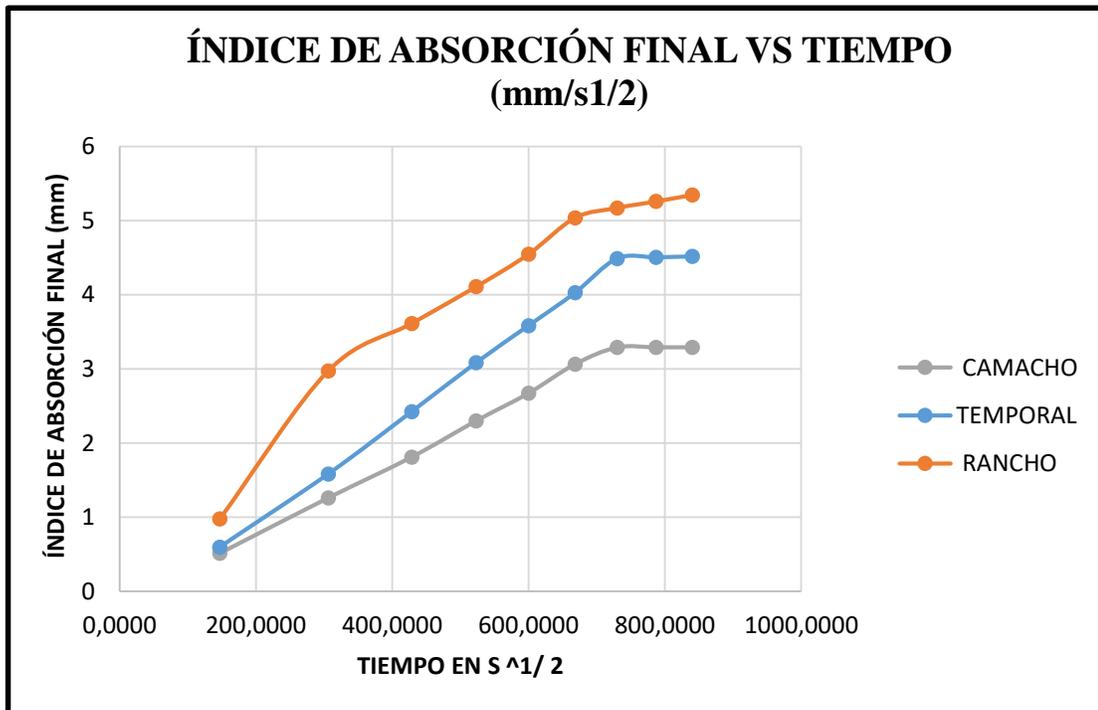


GRAFICA 4.5: Índice de Absorción Inicial Promedio (Temporal – Rancho - Camacho) vs Tiempo  
 FUENTE: Elaboración propia.

ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL PROMEDIO (mm)			
TIEMPO	TEMPORAL	RANCHO	CAMACHO
min	IA (mm)	IA (mm)	IA (mm)
1560,0000	1,582211	2,97378	1,25935
3060,0000	2,424501	3,61524	1,81080
4560,0000	3,085376	4,11044	2,29967
6000,0000	3,585567	4,54920	2,67274
7440,0000	4,028741	5,03927	3,06505
8880,0000	4,491353	5,17397	3,29157

10320,0000	4,506903	5,26121	3,29263
11760,0000	4,519862	5,34845	3,29263

TABLA 4.11: Índice de Absorción Final Promedio (Temporal – Rancho – Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.6: Índice de Absorción Final Promedio (Temporal – Rancho - Camacho) vs Tiempo  
FUENTE: Elaboración propia.

#### 4.4. Sorptividad.

En las tablas 4.9, 4.10 y 4.11 se encuentran los valores del índice de sorptividad.

##### a) Temporal

##### -Índice de Sorptividad

<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD TEMPORAL</b>
---------------------------------------

<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD INICIAL ISI(mm/s<sup>1/2</sup>)</b>					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )
0,0032	0,0033	0,0033	0,0032	0,0033	0,0033
<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL ISF(mm/s<sup>1/2</sup>)</b>					
T1	T2	T3	T4	T5	T6
ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )
0,0054	0,0054	0,0054	0,0054	0,0054	0,0054

*TABLA 4.12: Índice de Sorptividad (Temporal)*  
*FUENTE: Elaboración propia*

**b) Rancho**

**-Índice de Sorptividad**

<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD RANCHO</b>					
<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD INICIAL ISI(mm/s<sup>1/2</sup>)</b>					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )
0,0045	0,0045	0,0044	0,0045	0,0044	0,0045
<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL ISF(mm/s<sup>1/2</sup>)</b>					
R1	R2	R3	R4	R5	R6
ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )
0,0067	0,0069	0,0068	0,0068	0,0069	0,0068

*TABLA 4.13: Índice de Sorptividad (Rancho)*  
*FUENTE: Elaboración propia*

**c) Camacho**

**-Índice de Sorptividad**

<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD CAMACHO</b>					
<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD INICIAL ISI(mm/s<sup>1/2</sup>)</b>					
C1	C2	C3	C4	C5	C6
ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISI (mm/s <sup>1/2</sup> )
0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL ISF(mm/s<sup>1/2</sup>)</b>					
C1	C2	C3	C4	C5	C6
ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )	ISF (mm/s <sup>1/2</sup> )
0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049

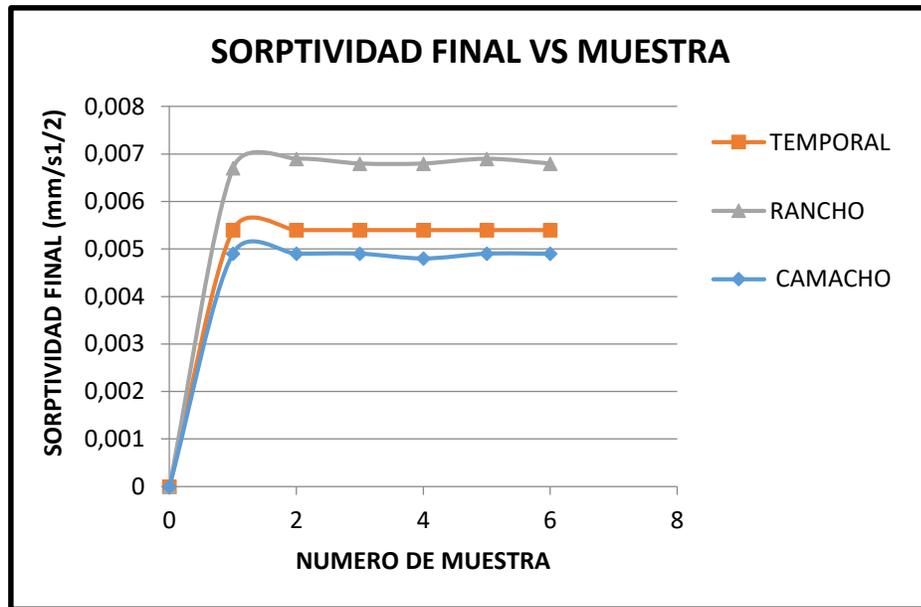
*TABLA 4.14: Índice de Sorptividad (Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*

#### **4.4.1. Sorptividad – Numero de muestras.**

<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL (mm/s<sup>1/2</sup>)</b>						
<b>PROCEDENCIA</b>	<b>NUMERO DE MUESTRA</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
TEMPORAL	0,0054	0,0054	0,0054	0,0054	0,0054	0,0054
RANCHO	0,0067	0,0069	0,0068	0,0068	0,0069	0,0068
CAMACHO	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049

*TABLA 4.15: Índice de Sorptividad Final (Temporal – Rancho – Camacho) para cada muestra*

FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.7: Índice de Sorptividad final (Temporal – Rancho - Camacho) vs Numero de muestra

FUENTE: Elaboración propia.

#### 4.5. Ecuaciones y Gráficas.

Los principales resultados de la investigación, además de los presentados en las páginas anteriores, consisten en establecer las relaciones (modelos matemáticos) cuyas variables más importantes son la resistencia a compresión simple, el índice de sorptividad y el índice de absorción. Otras relaciones adicionales se probaron con % de absorción y el peso específico aparente de los agregados.

Todos estos resultados, ecuaciones y sus respectivas gráficas, se presentan en la que sigue.

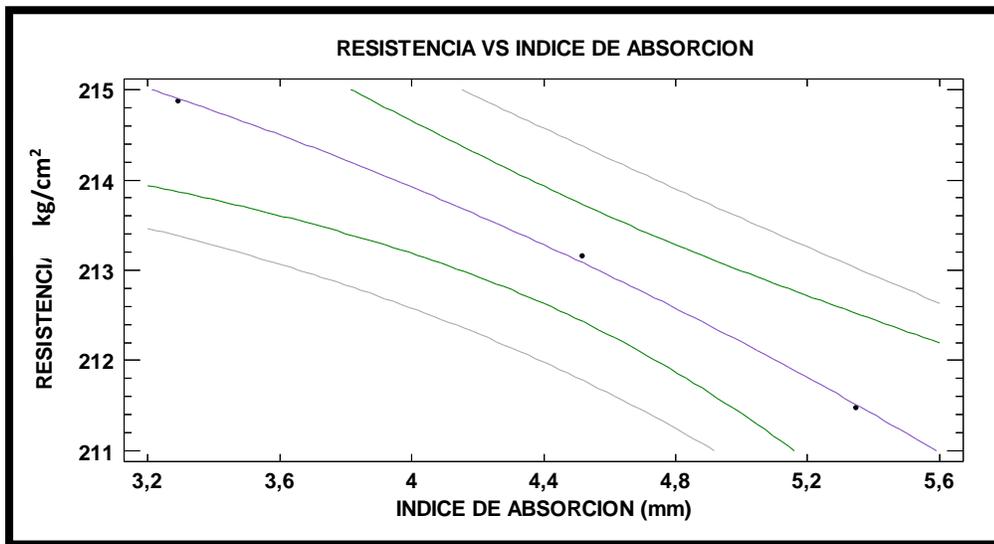
##### 4.5.1. Resistencia del Hormigón – Índice de Absorción Final del Hormigón.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	ÍNDICE DE ABSORCION FINAL (mm)

RANCHO	211,47	5,3485
TEMPORAL	213,15	4,5199
CAMACHO	214,87	3,2926

TABLA 4.16: Resistencia del Hormigón – Índice de Absorción final del Hormigón  
FUENTE: Elaboración propia

La gráfica 4.8 y su correspondiente ecuación (4.1.) muestran la relación  $R=f(IA)$ ; donde  $IA$ = Índice de absorción,  $R$ =Resistencia a 3compresión simple y  $CC$ = Coeficiente de correlación.



GRÁFICA 4.8: Resistencia vs Índice de Absorción Final Promedio (Temporal – Rancho - Camacho)

FUENTE: Elaboración propia.

$$R = \sqrt{47066,4 - 81,4578 IA^2} \quad (4.1.)$$

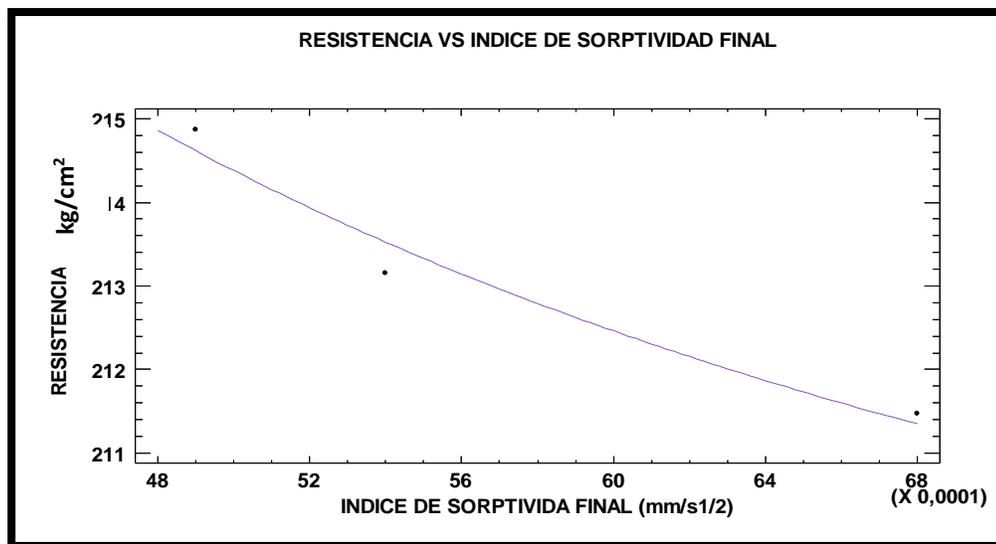
$$CC = 0,9993$$

#### 4.5.2. Resistencia del Hormigón – Índice de Sorptividad Final del Hormigón.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL (mm/sg <sup>1/2</sup> )
RANCHO	211,47	1,68
TEMPORAL	213,15	1,40
CAMACHO	214,87	1,21

TABLA 4.17: Resistencia del Hormigón – Índice de Sorptividad Final del Hormigón  
FUENTE: Elaboración propia

Por su parte, la gráfica 4.9 y la ecuación (4.2), muestran la relación entre la resistencia y el índice de sorptividad, también con un alto coeficiente de correlación.



GRÁFICA 4.9: Resistencia vs Índice de Sorptividad Final (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia.

$$R = \frac{1}{0,0049 - \frac{0,000001264}{IS}} \quad (4.2)$$

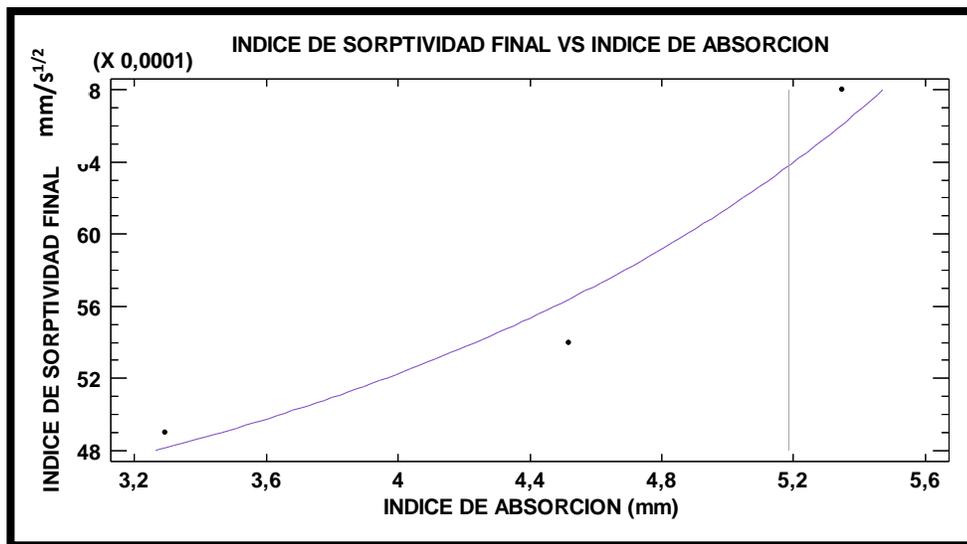
$$CC = 0,9811$$

**4.5.3. Índice de Sorptividad del Hormigón – Índice de Absorción del Hormigón.**

CANTERA	ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL (mm/sg <sup>1/2</sup> )	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)
RANCHO	0,0068	5,3485
TEMPORAL	0,0054	4,5199
CAMACHO	0,0049	3,2926

*TABLA 4.18: Índice del Hormigón – Índice de Absorción del Hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

También se tiene establecido una correlación entre el índice de sorptividad y el índice de absorción, cuyos resultados son la gráfica 4.10 y la ecuación (4.3.).



*GRÁFICA 4.10: Índice de Sorptividad Final (Temporal – Rancho - Camacho) vs índice de absorción*

*FUENTE: Elaboración propia.*

$$IS = \frac{1}{242,134 - 3,1745 IA^2} \quad (4.3.)$$

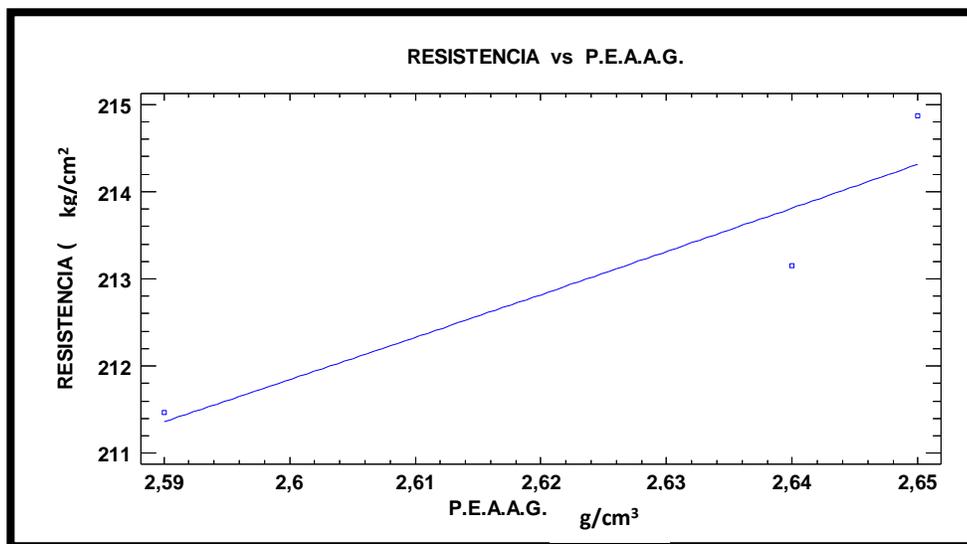
$$CC = 0,9718$$

#### 4.5.4. Resistencia del Hormigón – P.E.A. agregado grueso.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (Kg/cm <sup>2</sup> )	P.E.A. (gr/cm <sup>3</sup> ) AGREGADO GRUESO
RANCHO	211,47	2,59
TEMPORAL	213,15	2,64
CAMACHO	214,87	2,65

TABLA 4.19: Resistencia del Hormigón – P.E.A. del Agregado Grueso  
FUENTE: Elaboración propia

Del mismo modo, al correlacionar la resistencia a compresión simple del hormigón con el peso específico aparente del agregado grueso, se han obtenido la gráfica 4.11 y la ecuación (4.4.).



GRÁFICA 4.11: Resistencia (Temporal – Rancho - Camacho) vs P.E.A. Agregado Grueso  
FUENTE: Elaboración propia

$$R = \frac{1}{0,00612 - 0,0002674 P.E.A.A.G.^2} \quad (4.4.)$$

$$CC = 0,9330$$

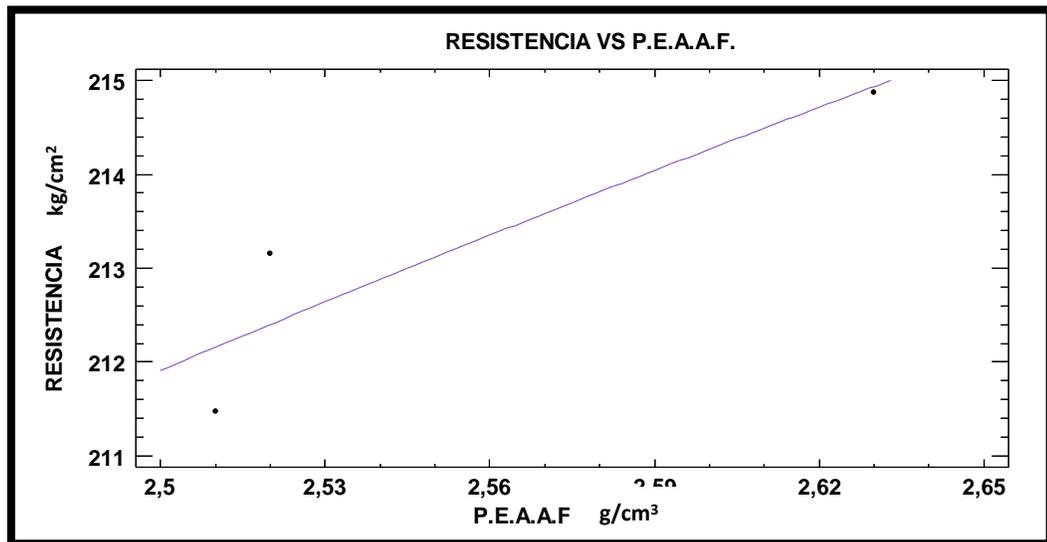
#### 4.5.5. Resistencia del Hormigón – P.E.A. agregado fino.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	P.E.A. (gr/cm <sup>3</sup> ) AGREGADO FINO
RANCHO	211,47	2,51
TEMPORAL	213,15	2,52
CAMACHO	214,87	2,63

TABLA 4.20: Resistencia del Hormigón (Temporal – Rancho – Camacho)- P.E.A. del Agregado Fino.

FUENTE: Elaboración propia

De igual manera, la correlación entre la resistencia del hormigón y el peso específico aparente del agregado fino, arroja la gráfica 4.12 y la ecuación (4.5.)



GRÁFICA 4.12: Resistencia vs P.E.A. del Agregado fino (Temporal – Rancho – Camacho)

FUENTE: Elaboración propia.

$$R = \sqrt{71005,4 - \frac{65246,4}{P.E.A.A.F.}} \quad (4.5.)$$

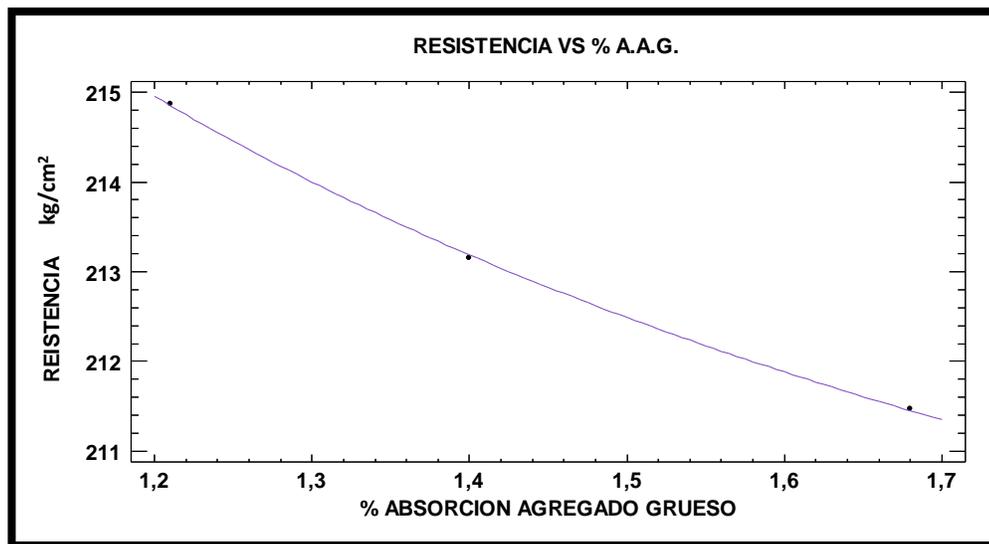
$$CC = 0,9895$$

#### 4.5.6. Resistencia del Hormigón – % Absorción agregado grueso.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	% ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO
RANCHO	211,47	1,68
TEMPORAL	213,15	1,40
CAMACHO	214,87	1,21

TABLA 4.21: Resistencia Del Hormigón (Temporal – Rancho – Camacho)- % Absorción Agregado Grueso

FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.13: Resistencia vs % Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho – Camacho)

FUENTE: Elaboración propia.

$$R = \frac{1}{0,004922 - \frac{0,0003235}{\% A. A. G.}} \quad (4.6)$$

$$CC = 0,9937$$

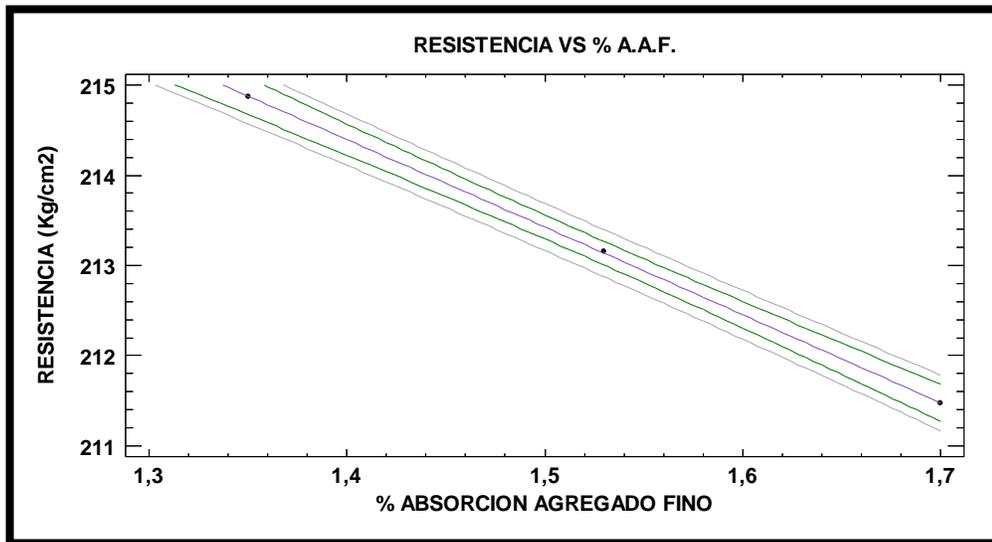
#### 4.5.7. Resistencia del Hormigón - % Absorción agregado fino.

<b>CANTERA</b>	<b>RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>% ABSORCION AGREGADO FINO</b>
<b>RANCHO</b>	211,47	1,70
<b>TEMPORAL</b>	213,15	1,53
<b>CAMACHO</b>	214,87	1,35

TABLA 4.22: Resistencia del Hormigón - % Absorción Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho).

FUENTE: Elaboración propia

kg/cm<sup>2</sup>



GRÁFICA 4.14: Resistencia vs % Absorción Agregado Fino (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia.

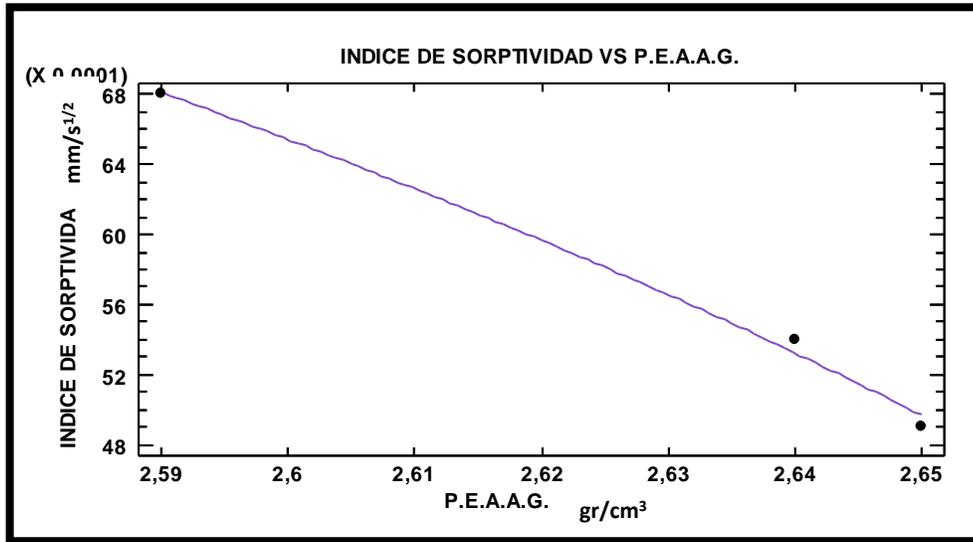
$$R = \sqrt{51762,6 - 4141,08 \%A. A. F.} \quad (4.7)$$

$$CC = 0,9999$$

#### 4.5.8. Índice de Sorptividad del Hormigón – P.E.A. agregado grueso.

CANTERA	INDICE DE SORPTIVIDAD SECUNDARIA (mm/sg <sup>1/2</sup> )	P.E.A. (gr/cm <sup>3</sup> ) AGREGADO GRUESO
RANCHO	0,0068	2,59
TEMPORAL	0,0054	2,64
CAMACHO	0,0049	2,65

TABLA 4.23: Índice de Sorptividad del Hormigón - P.E.A. Agregado Grueso (Temporal – Rancho – Camacho).  
FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.15: Índice de Sorptividad vs P.E.A. Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia.

$$IS = \sqrt{0,0005091 - 0,00006898 P.E.A.A.G^2}. \quad (4.8)$$

$$CC = 0,9979$$

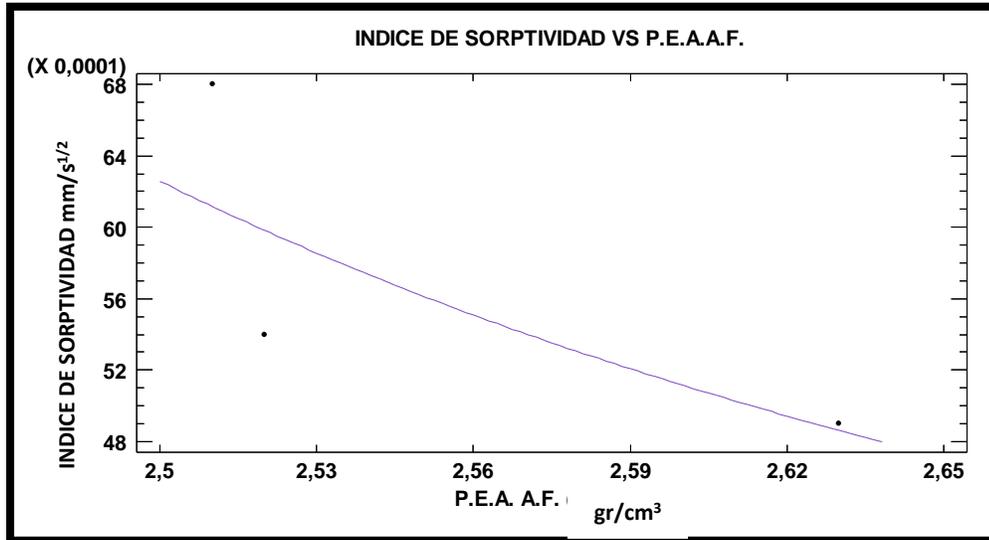
#### 4.5.9. Índice de Sorptividad del Hormigón – P.E.A. agregado fino.

CANTERA	ÍNDICE DE SORPTIVIDAD SECUNDARIA (mm/sg <sup>1/2</sup> )	P.E.A. (gr/cm <sup>3</sup> ) AGREGADO FINO
RANCHO	0,0068	2,51

<b>TEMPORAL</b>	0,0054	2,52
<b>CAMACHO</b>	0,0049	2,63

TABLA 4.24: Índice de Sorptividad del Hormigón – P.E.A. Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho).

FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.16: Índice de Sorptividad vs P.E.A. Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho)

FUENTE: Elaboración propia.

$$IS = \frac{1}{1087,12 - \frac{2318,28}{P.E.A.A.F.}} \quad (4.9)$$

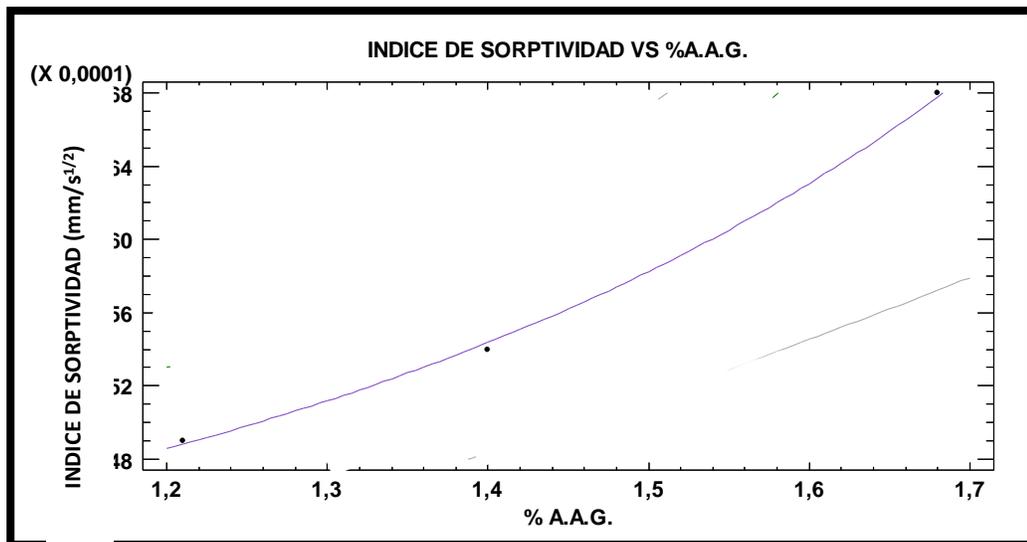
$$CC = 0,8037$$

#### 4.5.10. Índice de Sorptividad del Hormigón – % Absorción agregado grueso.

CANTERA	ÍNDICE DE SORPTIVIDAD	% ABSORCIÓN

	<b>SECUNDARIA (mm/sg<sup>1/2</sup>)</b>	<b>AGREGADO GRUESO</b>
<b>RANCHO</b>	0,0068	1,68
<b>TEMPORAL</b>	0,0054	1,40
<b>CAMACHO</b>	0,0049	1,21

*TABLA 4.25: Índice de Sorptividad del Hormigón - % Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho – Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*



*GRÁFICA 4.117: Índice de Sorptividad vs % de Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*

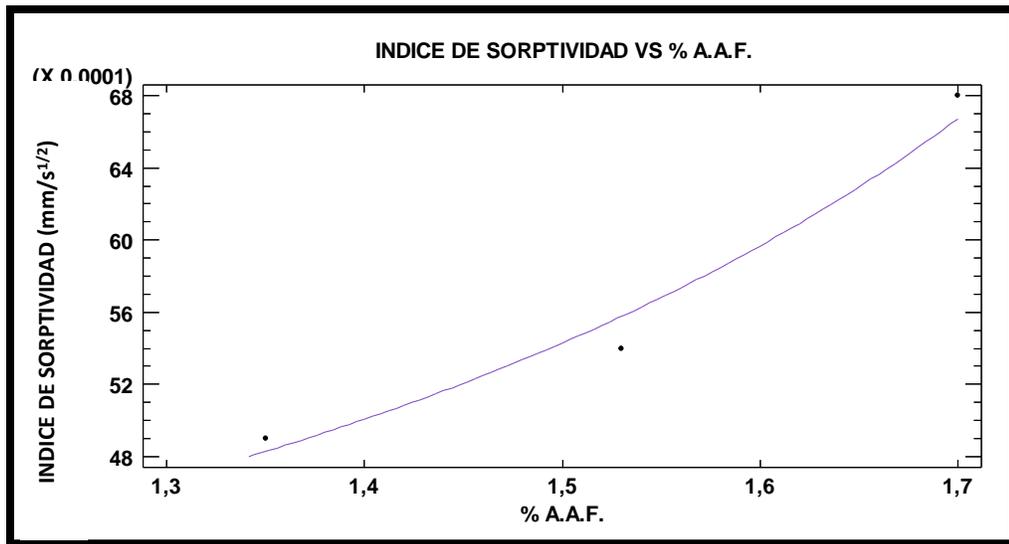
$$IS = \frac{1}{266,704 - 42,2295 \%A.A.G.^2} \quad (4.10)$$

$$CC = 0,9993$$

#### 4.5.11. Índice de Sorptividad del Hormigón - % Absorción agregado fino.

CANTERA	ÍNDICE DE SORPTIVIDAD SECUNDARIA (mm/sg <sup>1/2</sup> )	% ABSORCIÓN AGREGADO FINO
RANCHO	0,0068	1,70
TEMPORAL	0,0054	1,53
CAMACHO	0,0049	1,35

TABLA 4.26: Índice de Sorptividad del Hormigón - % Absorción Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.18: Índice De Sorptividad vs % Absorción Agregado Fino (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia

$$IS = \frac{1}{304,737 - 53,5751 \%A.A.F.^2} \quad (4.11)$$

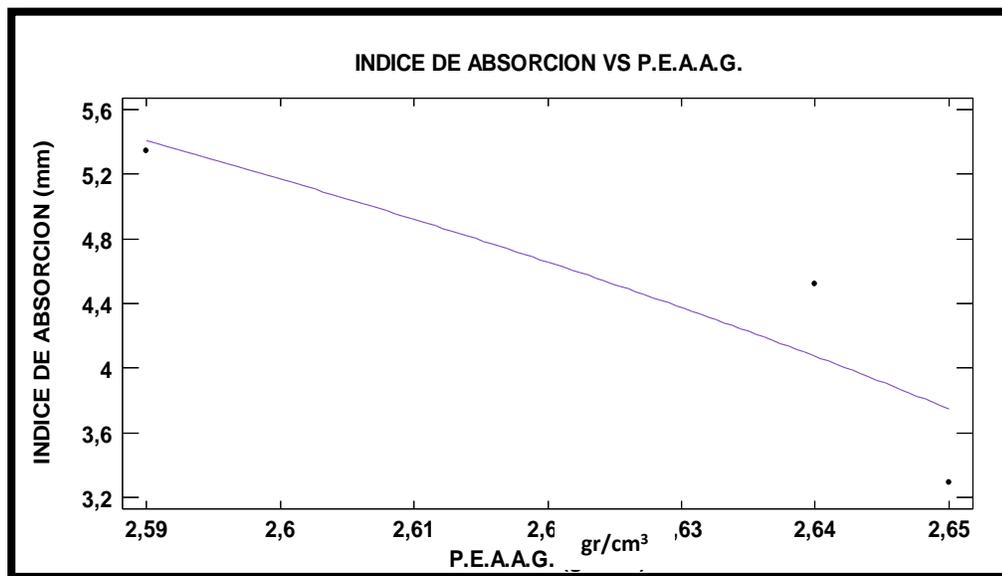
$$CC = 0,9846$$

4.5.12. Índice de Absorción del Hormigón – P.E.A. agregado grueso.

CANTERA	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)	P.E.A. (gr/cm <sup>3</sup> ) AGREGADO GRUESO
RANCHO	5,3485	2,59
TEMPORAL	4,5199	2,64
CAMACHO	3,2926	2,65

TABLA 4.27: Índice de Absorción del Hormigón – P.E.A. Agregado Grueso (Temporal – Rancho – Camacho).

FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.19: Índice de Absorción vs P.E.A. Agregado Grueso (Temporal – Rancho – Camacho)

FUENTE: Elaboración propia

$$IA = \sqrt{353,984 - 48,409 P.E.A.A.G.^2} \quad (4.12)$$

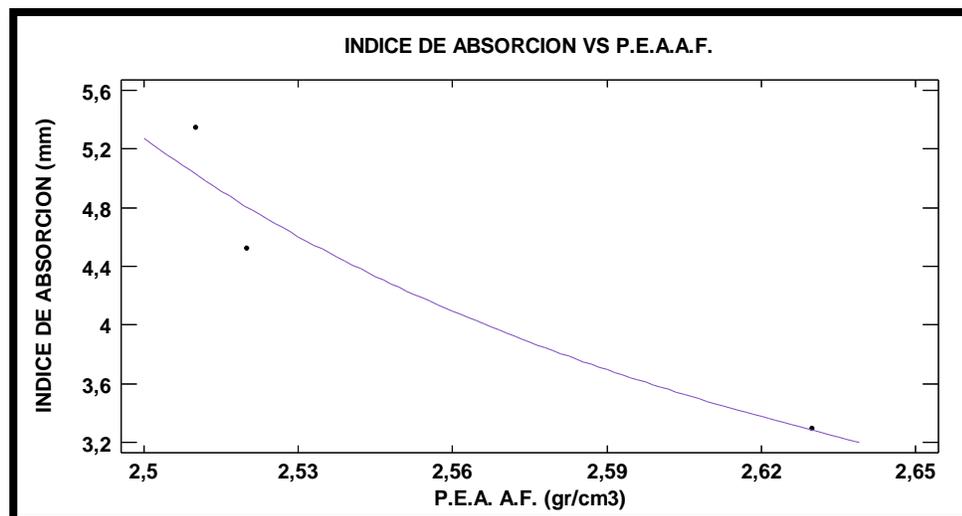
$$CC = 0,9165$$

#### 4.5.13. Índice de Absorción del Hormigón – P.E.A. agregado fino.

CANTERA	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)	P.E.A. (gr/cm <sup>3</sup> ) AGREGADO FINO
RANCHO	5,3485	2,51
TEMPORAL	4,5199	2,52
CAMACHO	3,2926	2,63

TABLA 4.28: Índice de Absorción del Hormigón - P.E.A Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho)

FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.20: Índice de Absorción vs P.E.A. Agregado Fino (Temporal – Rancho - Camacho)

FUENTE: Elaboración propia

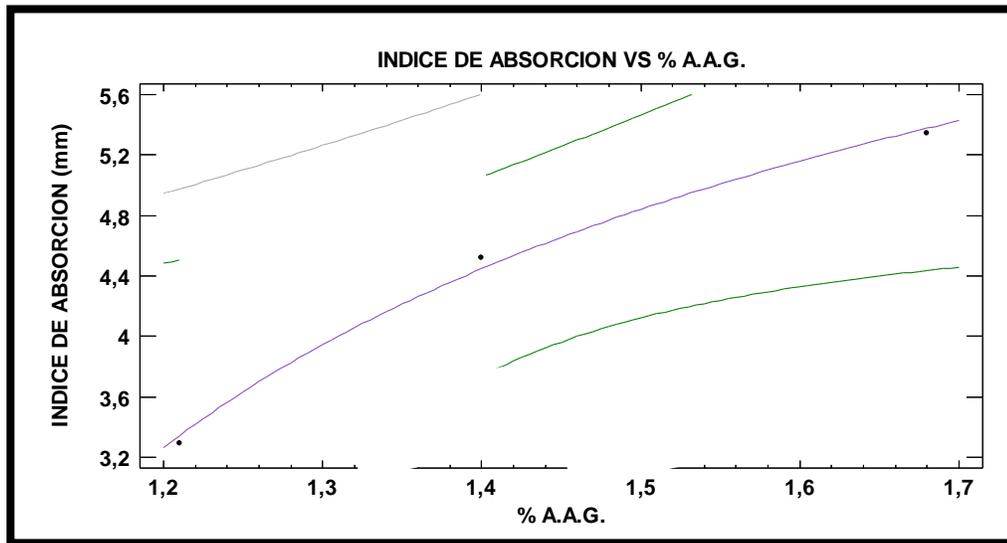
$$IA = \frac{1}{2,5204 - \frac{5,8268}{P.E.A.F.}} \quad (4.13.)$$

$CC = 0,9778$

**4.5.14. Índice de Absorción del Hormigón – % Absorción del agregado grueso.**

CANTERA	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)	% ABSORCION AGREGADO GRUESO
RANCHO	5,3485	1,68
TEMPORAL	4,5199	1,40
CAMACHO	3,2926	1,21

TABLA 4.29: Índice de Absorción del Hormigón - % Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho – Camacho).  
FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.21: Índice de Absorción vs % de Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia

$$IA = \sqrt{74,6066 - \frac{76,7532}{\% A. A. G.}} \quad (4.14)$$

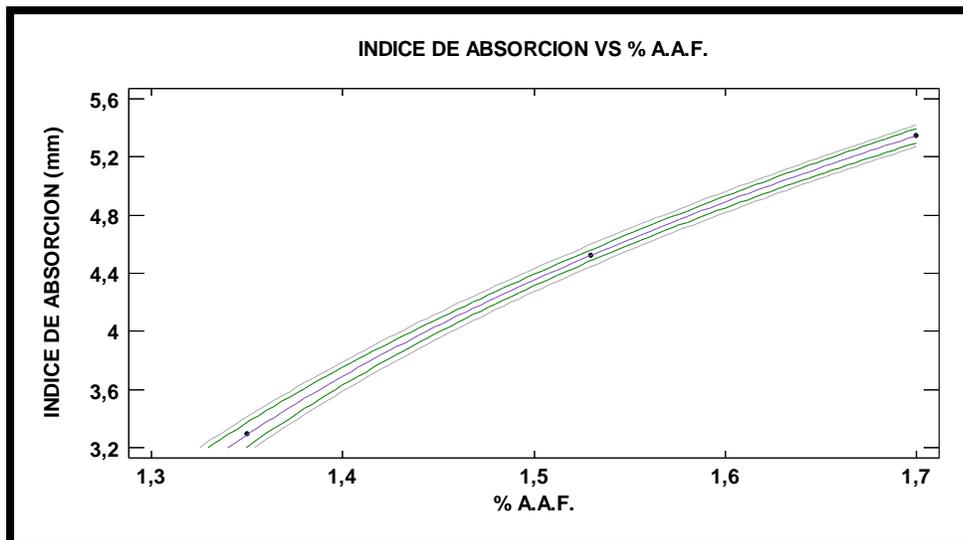
$$CC = 0,9980$$

**4.5.15. Índice de Absorción del Hormigón - % Absorción del agregado fino.**

CANTERA	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)	% ABSORCIÓN AGREGADO FINO
RANCHO	5,3485	1,70
TEMPORAL	4,5199	1,53
CAMACHO	3,2926	1,35

TABLA 4.30: Índice de Absorción del Hormigón - % Absorción Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho).

FUENTE: Elaboración propia



GRÁFICA 4.22: Índice de Absorción vs % Absorción Agregado Fino (Temporal – Rancho – Camacho)

FUENTE: Elaboración propia

$$IA = \sqrt{-12.2994 + 77,0505 \ln (\% A. A. F.)} \quad (4.15)$$

$$CC = 0,9999$$

Aunque la cantidad de mediciones es relativamente pobre, desde el punto de vista estadístico, se hará probado relaciones múltiples, es decir, una variable dependiente versus dos variables independientes, cuyos resultados de ecuaciones coeficientes de correlación, para dos casos se presentan a continuación.

#### 4.5.16. Resistencia del Hormigón VS Índice de Absorción Final del Hormigón – Índice de Sorptividad Final.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)	ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL (mm/sg <sup>1/2</sup> )
RANCHO	211,47	5,3485	0,0068
TEMPORAL	213,15	4,5199	0,0054
CAMACHO	214,87	3,2926	0,0049

TABLA 4.31: Resistencia del Hormigón vs Índice de Absorción Final del Hormigón - Índice de Sorptividad Final (Temporal – Rancho - Camacho)

FUENTE: Elaboración propia.

$$R = \frac{10^{2,2950}}{IA^{0,0191} * IS^{0,0204}} \quad (4.16)$$

$$CC = 1,00$$

#### 4.5.17. Resistencia del Hormigón VS Índice de Absorción Final del Hormigón - % Absorción agregado grueso.

CANTERA	RESISTENCIA PROMEDIO (kg/cm <sup>2</sup> )	ÍNDICE DE ABSORCIÓN FINAL (mm)	% ABSORCION AGREGADO GRUESO
---------	--	--------------------------------	-----------------------------

<b>RANCHO</b>	211,47	5,3485	1,68
<b>TEMPORAL</b>	213,15	4,5199	1,40
<b>CAMACHO</b>	214,87	3,2926	1,21

TABLA 4.32: Resistencia del Hormigón vs Índice de Absorción Final del Hormigón - % Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia.

$$R = \frac{10^{2,3399}}{IA^{0,0094} * \%A.A.G.^{0,0348}} \quad (4.17)$$

$$CC = 1,00$$

#### 4.5.18. Índice de Sorptividad Final del Hormigón VS P.E.A. agregado fino % Absorción agregado grueso.

<b>CANTERA</b>	<b>ÍNDICE DE SORPTIVIDAD FINAL (mm/sg<sup>1/2</sup>)</b>	<b>P.E.A. (gr/cm<sup>3</sup>) AGREGADO FINO</b>	<b>% ABSORCION AGREGADO GRUESO</b>
<b>RANCHO</b>	0,0068	2,51	1,68
<b>TEMPORAL</b>	0,0054	2,52	1,40
<b>CAMACHO</b>	0,0049	2,63	1,21

TABLA 4.33: Índice de Sorptividad Final del Hormigón vs Peso Específico Aparente Agregado Fino – % Absorción Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia

$$IS = \frac{1}{10^{3,3450}} * P.E.A.A.F.^{2,2064} * \%A.A.G.^{2,3125} \quad (4.18)$$

$$CC = 1,00$$

#### 4.6. Análisis de Resultados

- ✓ El valle central de Tarija se encuentra formado por rocas de origen del periodo ordovícico, rocas ígneas con intercalaciones de lutitas y cuarcitas, en el estrato superior de la composición del suelo la mayor parte es arcilla y rocas. En la tabla 4.34 podemos observar que los valores para el Temporal son mejor graduados, pero los dos bancos restantes están dentro de las especificaciones que nos da la Norma ASTM; en la tabla 4.35 podemos observar que el agregado fino de Camacho es mejor graduado que el banco de Temporal y Rancho, pero de la misma manera que los agregados gruesos caen dentro de las especificaciones límites.

<b>% QUE PASA DEL TOTAL AGREGADO GRUESO</b>				
<b>Temporal</b>	<b>Rancho</b>	<b>Camacho</b>	<b>% Que pasa s/g</b>	
<b>% Que pasa</b>	<b>% Que pasa</b>	<b>% Que pasa</b>		
<b>del total</b>	<b>del total</b>	<b>del total</b>	<b>Especif. ASTM</b>	
<b>100</b>	100	100	100	100
<b>100</b>	100	100	100	100
<b>98</b>	99	99	95	100
<b>79</b>	85	75		
<b>51</b>	57	38	35	70
<b>29</b>	23	18		
<b>14</b>	9	9	10	30
<b>0</b>	0	0	0	5

0	0	0		
---	---	---	--	--

*TABLA 4.34: % del Total que pasa del Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*

<b>% QUE PASA DEL TOTAL AGREGADO FINO</b>				
<b>Temporal</b>	<b>Rancho</b>	<b>Camacho</b>	<b>% Que pasa s/g</b>	
<b>% Que pasa</b>	<b>% Que pasa</b>	<b>% Que pasa</b>		
<b>del total</b>	<b>del total</b>	<b>del total</b>	<b>Especif. ASTM C-33</b>	
<b>100</b>	100	100	100	100
<b>100</b>	100	100	95	100
<b>90</b>	89	95	80	100
<b>81</b>	77	80	50	85
<b>59</b>	59	54	25	60
<b>20</b>	31	17	10	30
<b>3</b>	4	3	2	10
<b>4</b>	1	1		

*TABLA 4.35: % del Total que pasa del Fino (Temporal – Rancho - Camacho)  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ En general de las características de los agregados lo más representativo es lo que lleva a la densidad, los áridos de baja densidad son poco resistentes y porosos, las bajas densidades indican también que el material es poroso y débil y de alta absorción, cuando se habló de la densidad de los agregados, se mencionó la presencia en ellos de poros internos y, de hecho, las características de dichos poros son muy importantes en el estudio de sus propiedades, la porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción influyen.

Características Agregado Grueso						
	Peso Especifico	Peso Especifico	Peso Especifico	% Absorción	Peso Unitario	Peso Unitario
Banco de	a granel	saturado con	Aparente		Suelto	Compactado
Materiales		superficie seca				
	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>		gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>
Temporal	2,540	2,580	2,640	1,400	1,555	1,611
Rancho	2,480	2,520	2,590	1,680	1,566	1,607
Camacho	2,570	2,600	2,650	1,210	1,589	1,623

TABLA 4.36: Características Agregado Grueso (Temporal – Rancho - Camacho)

FUENTE: Elaboración propia

†

Características Agregado Fino						
	Peso Especifico	Peso Especifico	Peso Especifico	% Absorción	Peso Unitario	Peso Unitario
Banco de	a granel	saturado con	Aparente		Suelto	Compactado
Materiales		superficie seca				
	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>		gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>
Temporal	2,430	2,470	2,520	1,530	1,315	1,457
Rancho	2,400	2,440	2,540	1,700	1,446	1,583
Camacho	2,550	2,580	2,630	1,350	1,510	1,620

TABLA 4.37: Características Agregado Fino (Temporal – Rancho - Camacho)

FUENTE: Elaboración propia

- ✓ De acuerdo al diseño de mezclas que se efectuó se obtuvieron proporciones de acuerdo a las características de los materiales tanto como los agregados y el

cemento, las cuales son muy importantes para la dosificación de mezclas de hormigón, con las proporciones de mezcla se vaciaron probetas de hormigón que muestren resistencias a compresión a los 7 y 28 días de edad mostrados en la tabla 4.2 y 4.4, a través de la rotura de probetas, de acuerdo a las resistencias adquiridas de los agregados, las del Rancho están por debajo de las resistencias del resto de los agregados, con un valor promedio de 211,47 Kg/cm<sup>2</sup>, con los agregados de Camacho tuvieron una mejor resistencia promedio de 214,87 Kg/cm<sup>2</sup> con la dosificación, y el banco de Rancho se obtuvieron las resistencias más bajas y finalmente el Temporal muestra resistencias medias en los tres bancos, esto nos refleja la importancia que tienen las características de los agregados en el momento de diseñar una dosificación.

- ✓ Haciendo una comparación entre las tablas 4.9- 4.36, 4.37 refleja similar forma de variación en los valores ejemplo para el banco de Camacho su porcentaje de absorción del agregado es el más bajo en el agregado grueso y fino y también muestra el Índice de Absorción más bajo para el hormigón de la misma forma se presenta para el banco el Temporal y Camacho.
- ✓ De acuerdo a los resultados mostrados en tabla 4.15 se puede ver la misma forma de variación en el Índice de Sorptividad y la relación que este tiene con la variación del Índice de Absorción, esto se da a consecuencia de que el índice de sorptividad se calcula en base al índice de absorción por eso se encuentra el nexo de variación similar en ambos índices.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### 4.1. Conclusiones.

Al finalizar el presente trabajo de investigación con la elaboración de un documento importante que permita brindar información y de alguna manera guiar a los profesionales, estudiantes involucrados el empleo de hormigones en la construcción y de las medidas que se pueden seguir para asegurar las propiedades (resistencia - durabilidad) de las estructuras de hormigón frente al principal mecanismo de transporte del agua con agregados de la región, se establecen las siguientes conclusiones:

- ✓ El trabajo efectuado establece información que puede ser útil para el área de la construcción; con la evaluación del índice de sorptividad del hormigón, con agregados y cemento que usualmente se emplean en la región para la preparación de mezclas de hormigón y estructuras que principalmente se ven afectadas por mecanismos de transporte del agua, como también un análisis de su influencia a las propiedades del hormigón.

#### **-RESPECTO DE LOS AGREGADOS EMPLEADOS Y ESTUDIADOS**

- ✓ De acuerdo a las características de los agregados, se puede establecer que las de los agregados de Rancho presentan valores menores en sus pesos específicos como en sus resistencias, tienen menor consistencia que el resto de los agregados y a simple vista se puede notar que son lajosos y algunas piedras se rompen al hacer un esfuerzo con las manos.
- ✓ Los agregados de los yacimientos de Temporal y Camacho tienen una mejor consistencia y mejores densidades en cuanto a sus características.
- ✓ Al realizar los ensayos que determinan el % de absorción de los agregados, el ensayo (ASTM C-1585) se puede observar los siguientes resultados:

<b>BANCO</b>	<b>% ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO</b>	<b>% ABSORCIÓN AGREGADO FINO</b>	<b>ÍNDICE DE ABSORCIÓN DEL HORMIGÓN (mm)</b>
--------------	--	--------------------------------------	--

Rancho	1,68	1,70	5,349
Temporal	1,40	1,53	4,529
Camacho	1,21	1,35	3,293

*TABLA 5.1: Resultados % Absorción agregado grueso - % Absorción agregado fino – Índice de Absorción del hormigón  
FUENTE: Elaboración propia*

De acuerdo al porcentaje de absorción de los agregados de Rancho, Temporal y Camacho del agregado grueso son menores que el porcentaje de absorción del agregado fino estos porcentajes varían de forma similar al índice de absorción del hormigón. Con los resultados de ambos, los agregados del Rancho tienen mayor porcentaje de absorción y también tienen mayor índice de absorción, en cambio los resultados de Camacho de ambos son un poco más bajos que el resto de los agregados.

- ✓ Los agregados de Camacho tienen menor % de absorción de los agregados y también presentan menor índice de absorción del hormigón.

#### **-RESPECTO DE LA RESISTENCIA**

- ✓ La resistencia a compresión que se obtuvo de las mezclas de hormigón diseñadas con las características de los agregados a una resistencia estándar de 210 kg/cm<sup>2</sup> dieron aproximadas, las de menor resistencia fueron las de la cantera del Rancho.

<b>CANTERA</b>	<b>RESISTENCIA MAX DISIFICACION DISEÑADA (kg/cm)</b>
RANCHO	213,18
TEMPORAL	214,71
CAMACHO	216,75

*TABLA 5.2: Resistencias máximas obtenidas  
FUENTE: Elaboración propia*

- ✓ Con la elaboración de probetas convencionales para determinar la resistencia del hormigón se pudo verificar que los agregados que tienden a tener menor % de absorción tiene menor índice de absorción en el hormigón, no tienen influencia significativa en la resistencia a edades tempranas del hormigón, esta se manifiesta lentamente y afecta a su durabilidad; pero existe una tendencia suavizada de que los agregados con mayor resistencia tienen menor índice de Sorptividad en el hormigón, esto se puede observar en las gráficas 4.8 y 4.9 de análisis de resultados.

### **-RESPECTO A LA HIPÓTESIS**

Conforme a las hipótesis planteadas al realizar la investigación se pudo verificar lo siguiente:

- ✓ Con la elaboración de probetas convencionales para determinar la resistencia del hormigón se pudo verificar que los agregados que tienden a tener menor % de absorción tiene menor índice de absorción en el hormigón, tienen influencia a en la resistencia a edades tempranas del hormigón, esta se manifiesta lentamente y afecta a su durabilidad; pero existe una tendencia suavizada de que los agregados con mayor resistencia tienen menor índice de Sorptividad en el hormigón, esto se puede observar en las gráficas 4.8 y 4.9 de análisis de resultados, con estos resultados se estaría cumpliendo la hipótesis planteada.

### **-RESPECTO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS**

- ✓ “La durabilidad del hormigón es inversamente proporcional a la magnitud del INDICE DE SORPTIVIAD”, esto se demuestra con las ecuaciones 4.1 y 4.2.
- ✓ “La calidad del hormigón, expresada en términos de resistencia a la compresión simple, es inversamente proporcional a la magnitud del INDICE DE SORPTIVIDAD.
- ✓ La comparación del orden de la variación en las propiedades del hormigón (resistencia, índice de absorción, y el índice de sorptividad) señalo que hay una fuerte correlación entre ellos. Las tres propiedades del hormigón medidas tienen

tendencia similar para los tres hormigones y para los agregados Temporal Rancho y Camacho.

- ✓ Considerando las limitaciones del estudio en relación a la disponibilidad de tiempo y de recursos, es evidente que el tamaño de la muestra utilizada no es el más apropiado. Sin embargo, los resultados obtenidos son absolutamente coherentes, compatibles y coincidentes con la tendencia internacional en el fenómeno estudiado. En todo caso el tamaño de la muestra aconsejable es de 30, según el teorema de límite central establecido en la literatura de estadística aplicada.
- ✓ Tomando en cuenta la anterior conclusión se abre una línea de investigación para quienes tengan interés y quieran profundizar el estudio de los fenómenos y mecanismos de transporte del agua en el hormigón y su influencia en las propiedades de este material.

#### **-DE LA IMPORTANCIA EN LA CONSTRUCCIÓN**

- ✓ Elevados índices de sorptividad es considerada como la degeneración del hormigón que ha sido un tema estudiado y de mucha importancia en varios países del mundo, y como es un país que está en desarrollo y progreso desde el punto de vista estructural con obras nuevas y de gran magnitud; es necesario y fundamental tomar en cuenta esta patología que puede ser prevenida y evitada tomando medidas apropiadas antes de la construcción de obras.
- ✓ Las obras que están sometidas a humedad y a grandes temperaturas como pavimentos rígidos, presas, canales, fundaciones, etc. Necesitan mayor preocupación al estar en riesgo de presentar elevados índices de sorptividad del hormigón y tomar las medidas necesarias para un mejor resultado y mayor durabilidad.

#### **4.2. Recomendaciones.**

- ✓ Al momento de realizar el diseño de mezclas y de la elección de los áridos que serán empleados para la construcción de obras es imprescindible conocer el índice de Sorptividad del hormigón, para evitar representativas fisuras y agrietamientos que

afectan a la estética de la estructura, deterioros rápidos del hormigón, refaccionamientos y reparaciones costosas.

- ✓ Considerando las limitaciones del estudio en relación a la disponibilidad de tiempo y de recursos, es evidente que el tamaño de la muestra utilizada no es el más apropiado. Sin embargo, los resultados obtenidos son absolutamente coherentes, compatibles y coincidentes con la tendencia internacional en el fenómeno estudiado. En todo caso el tamaño de la muestra aconsejable es de 30, según el teorema de límite central establecido en la literatura de estadística aplicada.
- ✓ Tomando en cuenta la anterior conclusión se abre una línea de investigación para quienes tengan interés y quieran profundizar el estudio de los fenómenos y mecanismos de transporte del agua en el hormigón y su influencia en las propiedades de este material.
- ✓ Actualmente en la ciudad de Tarija no se cuenta con ningún laboratorio para realizar los ensayos que determinen el índice de sorptividad porque no se ha dado la importancia necesaria a este tema en la construcción. La implementación de laboratorios del campo del cemento y la construcción deben ponerse a la altura de las crecientes exigencias poniendo a punto los métodos y normas técnicas más usuales, así como capacitar permanentemente al personal técnico. Identificar y coadyuvar en la evaluación, localización y mapeado de las canteras de agregados de nuestro país.
- ✓ Se recomienda que al momento de elaborar las probetas cilíndricas estas deben ser fabricadas siguiendo las normas de ensayo, el curado debe ser el mismo para todas las muestras, los especímenes no deben presentar daños externos; para obtener resultados mejores.
- ✓ Para los estudios experimentales de investigación se debe tomar la cantidad de muestra necesarias para tener resultados con mayor precisión.