

# **CAPÍTULO I**

## **ANTECEDENTES**

## **1.1. El problema**

### **1.1.1. Planteamiento**

La retracción por secado es una deformación volumétrica que se desarrolla a lo largo del tiempo, durante el estado endurecido, esto como consecuencia de la pérdida paulatina del agua. Las deformaciones producidas por la retracción pueden generar esfuerzos internos y cuando estos exceden las tensiones del hormigón llegan a generar fisuras, que pueden ser estructurales o no estructurales.

Este fenómeno ha sido objeto de muchos estudios de investigación que permitieron elaborar modelos para estimar la retracción para sus propias condiciones de estudio, pero a pesar de todos estos estudios existe aún incertidumbre en los valores estimados, por lo cual es importante poder contrastar los resultados estimados con mediciones realizadas de manera experimental.

### **1.1.2. Formulación**

¿Cómo influye el tiempo de secado en la retracción del hormigón?

Al ser un fenómeno que ocurre a lo largo del tiempo es importante poder estudiar en que tiempo ocurren las mayores deformaciones y como se llegan a desarrollar después de la misma.

### **1.1.3. Sistematización**

La presente investigación sigue una línea de carácter experimental para estudiar el comportamiento del hormigón debido a la retracción por secado, por lo cual se realiza el ensayo correspondiente para medir la retracción, obteniendo las deformaciones de unas probetas prismáticas de sección cuadrada durante un periodo de tiempo de veintiocho días, dejándolas expuestas a las condiciones ambientales de humedad relativa y temperatura en la ciudad de Tarija provincia Cercado y realizar una comparación con los modelos de estimación propuestos por el comité ACI 209.2R-08 de tal manera de poder observar su variabilidad.

Los modelos propuestos por el comité ACI 209.2R-08 que se usarán para la comparación serán:

- Modelo ACI 209R-92
- Modelo B3 Bažant-Baweja
- Modelo CEB MC90-99
- Modelo GL2000

Se hará el empleo de estos cuatro modelos de estimación debido a que estos requieren de los mismos datos para poder realizar las estimaciones de la retracción por secado.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. General**

Determinar el comportamiento de la retracción por secado del hormigón; utilizando el cemento Fancesa IP-30 en la ciudad de Tarija-Cercado de tal manera de cuantificar sus deformaciones de forma eficiente.

### **1.2.2. Específicos**

- Realizar un análisis estadístico confiable de las mediciones de la retracción por secado.
- Establecer un número de mediciones confiables de las muestras de hormigón.
- Analizar el respaldo teórico de los factores relacionados con la dosificación de la mezcla que influyen en la retracción por secado.
- Analizar el cambio de longitud del hormigón.
- Calcular la pérdida del agua en los hormigones como consecuencia de la retracción por secado e identificar hasta que día ocurre la mayor pérdida de agua.
- Realizar una especificación técnica propia del procedimiento de ensayo.
- Estimar la retracción por secado que podrían tener los hormigones usando los modelos predictivos planteados por el comité ACI 209.2R-08 y realizar una comparación e interpretación con los resultados obtenidos en laboratorio.

## **1.3. Justificación**

En Bolivia el estudio de la retracción del hormigón, es un tema que no ha sido estudiada, incluso en comunicación con la fábrica de cemento FANCESA y SOBOCE indican que no se realiza ensayos para evaluar la retracción de sus cementos, por esta razón el presente

proyecto se enfoca en abrir los caminos para el estudio de esta rama de la mecánica que tiene como finalidad estudiar y determinar las deformaciones debido a la retracción por secado.

De acuerdo a la autoridad de fiscalización de empresas AEMP en mayo de 2021 realizó un estudio de mercado de cemento en Bolivia, dentro del cual dio a conocer los principales cementos que se comercializan en cada departamento, del cual en Tarija este estudio arrojó que son tres las principales marcas de cementos que tienen presencia en los mercados de Tarija, siendo estos los cementos: Itacamba, El Puente y Fancesa, de los mismos los dos últimos son los más comercializados y ofrecen los tipos de cemento IP 30 y IP 40, sin embargo la fábrica de cemento Fancesa es la única que comercializa el IP 40 en pequeñas o grandes cantidades y no habría inconvenientes en la obtención de este tipo de cemento al momento de querer estudiarlo, para el presente proyecto se seleccionó el cemento Fancesa de tipo IP 30 pues su implementación de este tipo de cemento se da más en hormigones estructurales de viviendas y edificios, es un cemento que ofrece un bajo calor de hidratación debido a que tiene más contenido de puzolana y que ayuda a reducir retracciones térmicas sin embargo empeora la retracción por secado, debido a esto es importante estudiar este tipo de cemento que es de uso común, por lo cual el presente trabajo será una fuente de información sobre la retracción de este tipo de cemento.

La selección de la resistencia del hormigón puede depender de ciertos factores como ser: si el hormigón es preparado en obra en la cual es muy probable que las resistencias que se alcancen pueden ser relativamente bajas debiendo escogerse un valor bajo de resistencia característica para garantizar que llegue a la misma, por otro lado si el hormigón es suministrado por una empresa dedicada a su elaboración, esta tendrá una buena calidad que garantiza su resistencia pudiendo escoger valores más altos de resistencia característica, pero la resistencia también va estar relacionada con la finalidad con la que se va usar pues cuando las solicitaciones de las cargas son pequeñas basta con usar resistencias menores, sin embargo si las solicitaciones son mayores se van a requerir resistencias más altas que además ayudarían a optimizar las secciones, para el presente estudio se seleccionó dos resistencias características la de  $210 \text{ Kg/cm}^2$  que se emplea generalmente en viviendas convencionales, sin embargo no está exento su uso en edificios, además es recomendable prever este tipo de hormigón pues en obra es difícil poder llegar a resistencias más elevadas incluso con un

control de obra intenso, la otra resistencia seleccionada es de 250 Kg/cm<sup>2</sup> si bien es una resistencia difícil de obtener en obra, esta puede ser suministrada por una empresa, por lo cual es importante evaluar la retracción de estas resistencias que sí se presentan en la construcción.

#### **1.4. Alcance**

El presente trabajo de investigación es necesario realizarlo para recabar información primaria y así dar a conocer el comportamiento de la retracción por secado en su etapa experimental a través de la medición de las deformaciones de los hormigones con resistencias características de 210 y 250 kg/cm<sup>2</sup> y poderlos comparar con las estimaciones calculadas con los cuatro modelos de estimación propuestos por el comité ACI 209.2R-08.

Los cálculos que se realizarán con los modelos de estimación serán comparados únicamente con los días que recomienda el ensayo ASTM C 157 de retracción por secado.

#### **Tamaño de la muestra a ensayar**

Para poder realizar el ensayo de la retracción por secado de tal manera de obtener resultados satisfactorios la investigación se respalda en la normativa de ensayo ASTM C 157, la cual indica que puede constar de 4 probetas prismáticas rectangulares, pero el ensayo también menciona que es preferible realizar 12 probetas, debido a esto el presente trabajo de investigación se realizara para 12 probetas prismáticas rectangulares para la resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y otras 12 para una resistencia de 250Kg/cm<sup>2</sup>.

#### **1.5. Hipótesis**

Conociendo las deformaciones reales del hormigón a través de mediciones, se establece que conforme aumenta el tiempo de secado mayor será la retracción.

#### **1.6. Definición de las variables**

##### **1.6.1. Variable independiente**

- Tiempo de medición de la retracción

##### **1.6.2. Variable dependiente**

- Retracción por secado

# **CAPÍTULO II**

## **FUNDAMENTO TEÓRICO**

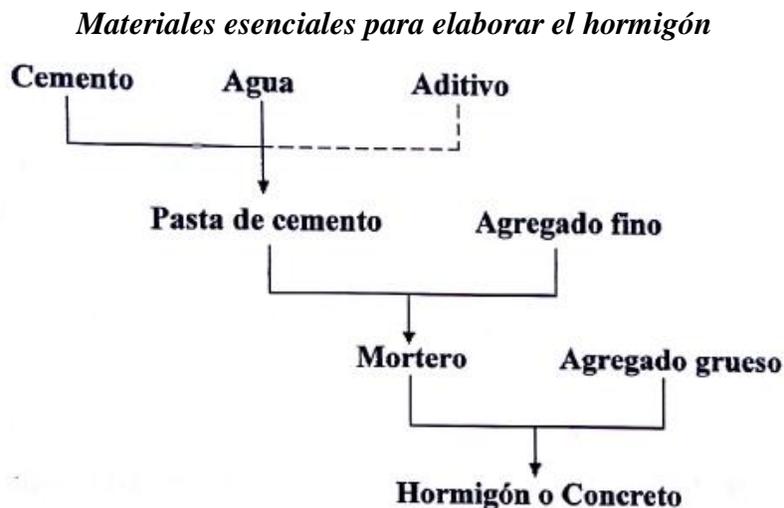
## 2.1. El Hormigón

El hormigón como material de construcción ha estado presente en multitud de estructuras y es el más utilizado a nivel mundial debido a su trabajabilidad, durabilidad, resistencia y facilidad para conseguir sus componentes, desde los albores de la historia del Imperio Romano hasta nuestros días el hormigón ha ido evolucionando desde su puesta en obra hasta los ensayos que se realizan sobre él mismo para poder controlar su calidad, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas para poder resistir los esfuerzos que se puedan presentar (Cordero, Maqueda, & Ruiz Abrio, 2012).

## 2.2. Características del hormigón

El hormigón es el resultado de la mezcla de materiales de naturaleza heterogénea, estos materiales esencialmente son el cemento, agua y los agregados gruesos y finos pudiendo incluso incorporar un cuarto componente que suele ser llamado genéricamente como aditivo (Díaz, 2005).

Fig. 2.1.



Fuente: “Análisis comparativo del comportamiento del hormigón entre la caracterización de sus componentes y su resistencia a tracción”, tomado de Díaz.

De acuerdo a la fig. 2.1. se tiene que:

- La mezcla de cemento y agua se la suele llamar pasta de cemento, que en esta puede ir mezclada con un aditivo de acuerdo a lo que se requiera.
- La mezcla de la pasta de cemento con el agregado fino se la denomina como mortero.

- La mezcla del mortero con el agregado grueso se la denomina como hormigón.

### **2.3. Reología del hormigón**

La reología se enfoca en estudiar una correspondencia entre el esfuerzo y la deformación en los materiales producidas por causas tensionales a lo largo del tiempo de esta manera el objetivo de la reología es estudiar el comportamiento de los materiales (Urtubey & Lorefice, 2005).

Al estudiar la reología del hormigón se pretende analizar y evaluar las deformaciones diferidas producidas en este material debido a cargas de larga duración, los fenómenos reológicos más importantes son la retracción y la fluencia, dichos fenómenos ocurren simultáneamente estas se pueden estudiar por separado (Urtubey & Lorefice, 2005).

### **2.4. Retracción**

La retracción del hormigón puede ser definida como el cambio de volumen que tiene lugar tanto en su estado fresco como endurecido dando lugar a una deformación e incluso atribuyéndole como el causante más frecuente de los agrietamientos en las estructuras, cuyo origen no se debe a cargas externas, sino que están asociadas a tensiones capilares, como consecuencia de pérdida paulatina del agua en la pasta de cemento. (García, Morán, & Arroyo, 2009).

De acuerdo a García (2011) indica que el agua que se encuentra en la pasta de cemento puede ser distinguida como:

- **Agua capilar**

Este tipo de agua presente en la pasta de cemento se puede distinguir de dos formas, una es el agua libre presente en poros mayores a 50nm y que si esta se evapora no provoca esfuerzos en el hormigón, la otra forma que se presenta es en poros entre 5 y 50nm, la pérdida de esta agua puede ejercer tensiones hidrostáticas induciendo un esfuerzo de compresión en las paredes capilares ocasionando la retracción, en general este tipo de agua desaparece para humedades relativas menores al 45% (García E. , 2011).

- **Agua adsorbida**

El agua adsorbida está ligada a la superficie sólida considerándola parte de la estructura unidas por fuerzas de atracción física de van de Waals que son atracciones débiles que mantienen unidas a moléculas eléctricamente neutras; físicamente la mayor parte de esta agua se pierde cuando el hormigón está expuesto a una humedad relativa menor o igual al 30%, a este tipo de agua se le atribuye como el responsable de la retracción por secado que afecta a la pasta de cemento (García E. , 2011).

- **Agua intersticial o agua entre capas de la fase S-C-H**

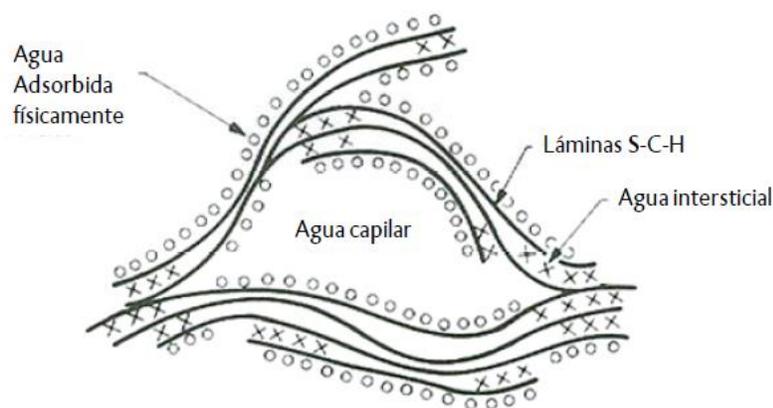
Este tipo de agua se encuentra en capas físicamente ligadas por enlaces de puentes de hidrógeno, el agua puede perderse por debajo de humedades relativas del 11% (García E. , 2011).

- **Agua combinada químicamente**

Se encuentra en la microestructura del cemento, tiene la particularidad de que no puede ser eliminada con el secado del material (García E. , 2011).

**Fig. 2.2.**

*Esquema de los tipos de agua debido a la hipótesis de Feldman y Sereda*



Fuente: “Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental”, tomado de García.

## 2.5. Clasificación de la retracción

Durante el proceso en el cual el hormigón va obteniendo resistencia van ocurriendo distintos tipos de retracción la cual puede constar de dos fases: la primera es durante el estado fresco del hormigón, presentándose la retracción plástica y química correspondientes durante el proceso de fraguado de la mezcla donde se presenta una expansión térmica y una retracción

posterior la cual está relacionada con un porcentaje de la retracción autógena y la otra fase es durante el endurecimiento del hormigón la cual ocurre posterior al fraguado durante el cual se termina de desarrollar la retracción autógena y apareciendo la retracción por secado y de carbonatación (García E. , 2011).

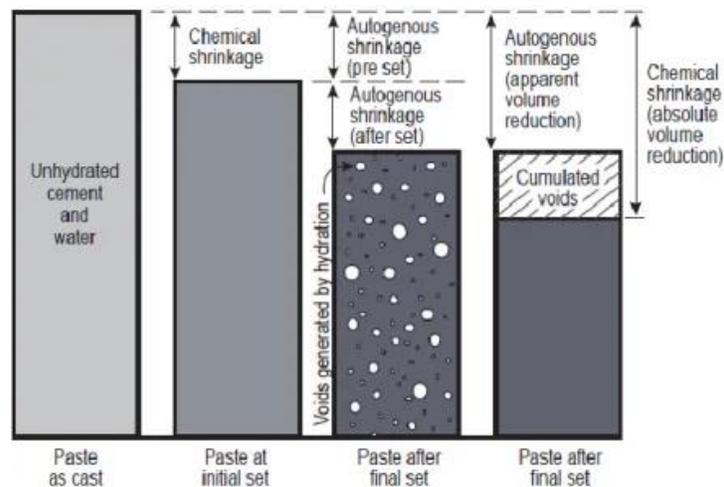
#### a) **Retracción química o autógena**

Es ocasionada por la propia naturaleza de la hidratación del cemento, donde los volúmenes iniciales de agua y cemento son mayores que el volumen final del hidrato resultante apareciendo un volumen de poros por la hidratación (García E. , 2011).

Posterior al fraguado del hormigón es decir durante el estado endurecido la llaman retracción autógena que en sí es un proceso continuo de la retracción química como se puede ver en la fig. 2.3. y cuando esta se la quiere analizar para fines de cálculo se llega a excluir las deformaciones producidas por la retracción plástica (García E. , 2011).

**Fig. 2.3.**

#### *Relación entre retracción química y autógena*



Fuente: “Influencia de áridos de villa clara y ciego de Ávila en el comportamiento de la fisuración por cambios de volumen del hormigón”, tomado de Ortega Dayana.

#### b) **Retracción plástica**

Está relacionada con la pérdida del agua que se encuentra en la parte superficial del hormigón en su estado fresco es decir una vez ha desaparecido el agua de exudación, ocurriendo durante las primeras horas, específicamente desde el momento en que este

ha sido hormigonado y antes de que se haya producido resistencias significativas; las fisuras relacionadas con ella se producen en la mayoría de los casos en superficies horizontales, siendo la principal causa la excesiva pérdida de agua por evaporación de la superficie de hormigón donde la evaporación supera al agua que puede subir a la superficie del hormigón (García E. , 2011).

**Fig. 2.4.**

***Hormigón en estado fresco***



Fuente: Elaboración propia.

**c) Retracción por secado o hidráulica**

Considerada por muchos autores como la más conocida y más estudiada entre todas las retracciones, esta tiene lugar durante el estado endurecido del hormigón asociada a la pérdida de agua adsorbida dicha retracción se llega a medir a distintas edades y su efecto puede continuar durante meses incluso años (García E. , 2011).

**d) Retracción por carbonatación**

El cambio dimensional ocurre a largo plazo, relacionada con la pérdida o lavado de productos de carbonatación en la superficie del hormigón. La carbonatación es resultado de los compuestos de cemento hidratado como es el caso del hidróxido de calcio (García E. , 2011).

Las reacciones químicas que se producen llevan a una reorganización de la microestructura de la pasta de cemento, generándose una disminución de la porosidad y un decremento total del volumen del material (García E. , 2011).

## 2.6.El fenómeno de la retracción por secado

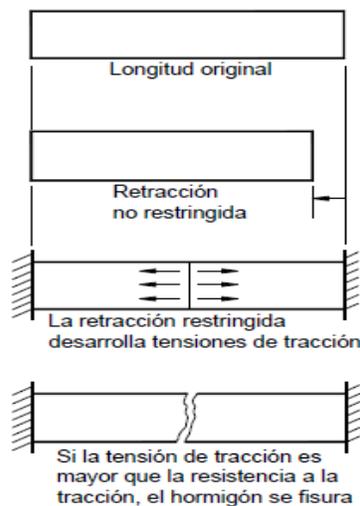
La retracción por secado está definida como la disminución de volumen debida a la pérdida paulatina del agua, ocasionada por un gradiente higrométrico con el aire, es decir que si el medio cuenta con una humedad relativa menor a la que se presenta en el interior del hormigón el mismo tiende a encogerse por el contrario si la humedad que contiene el hormigón es menor a la que se presenta en el medio externo la misma tiende a expandirse, este tipo de retracción se puede llegar a medir de una manera practica en una probeta que no está sometida a la acción de una cargada externa (García E. , 2011).

## 2.7.Consecuencias debido a la retracción por secado

La retracción por secado en los materiales a base de cemento endurecido puede dar lugar fácilmente a tensiones y grietas, cuando el elemento estructural está restringido por ejemplo lateralmente como se pude ver en la fig. 2.5. (Allen, Barlow, & Brander, 2001).

**Fig. 2.5.**

### *Fisuración de un elemento estructural restringido lateralmente*



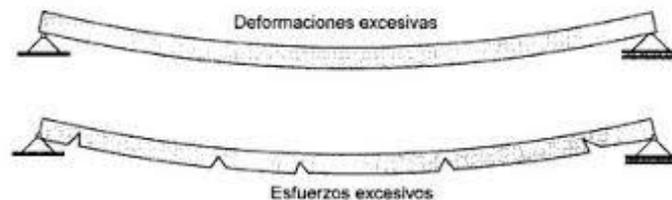
Fuente: "Control de la fisuración en estructuras de hormigón", tomado de Allen et. al.

Cuando el elemento estructural está restringido por ejemplo en el caso de una viga limitada por las columnas esta tiende a contraerse provocando tensiones de tracción que suelen llegar a ser mayor a la resistencia a tracción del hormigón y debido a que el secado del hormigón no ocurre de manera uniforme desde la superficie al interior van a provocar fisuras (Allen, Barlow, & Brander, 2001).

Al ser la retracción un fenómeno dependiente del tiempo esta se va dar lugar a un alabeo con fisuras superficiales, las cuales alivian las tensiones, pero que con el tiempo estas pueden profundizar más en el elemento ver fig. 2.6. (Allen, Barlow, & Brander, 2001).

**Fig 2.6.**

***Alabeo debido a la retracción por secado***



Fuente: “Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental”, tomado de García.

## **2.8. Factores que influyen en la retracción por secado del hormigón**

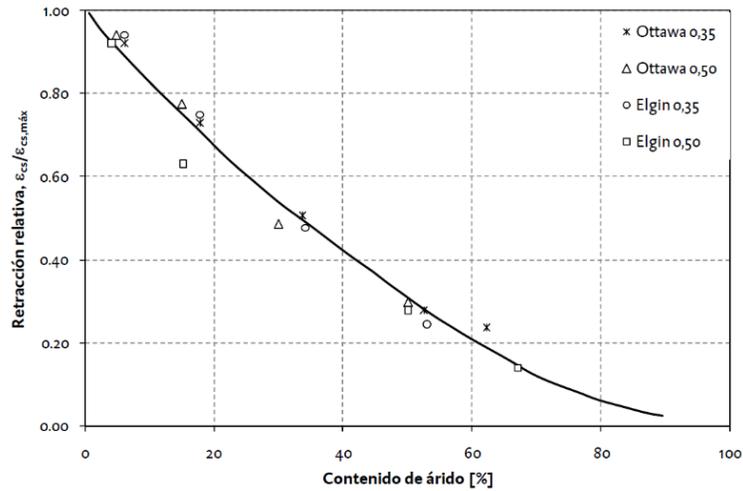
Los factores que afectan a la retracción son numerosos, por ello se los puede agrupar en tres grupos: factores relacionados con la dosificación de la mezcla, factores relacionados con el ambiente y factores relacionados con el método de ejecución (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009)

### **2.8.1. Factores relacionados con la dosificación de la mezcla**

Dentro de este grupo los factores que tienen influencia en la retracción por secado son el contenido de agregado, tamaño de los áridos, contenido de agua y cemento, de estos factores se dice el que contenido de agregado es el factor más importante, si bien la retracción se da en la pasta de cemento, el agregado tiene la propiedad de reducir estas deformaciones, pues cuanto mayor sea el contenido de árido menor será la retracción (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

En la fig. 2.7. se puede ver la relación directa entre el contenido de agregado y la retracción del hormigón.

Fig. 2.7.

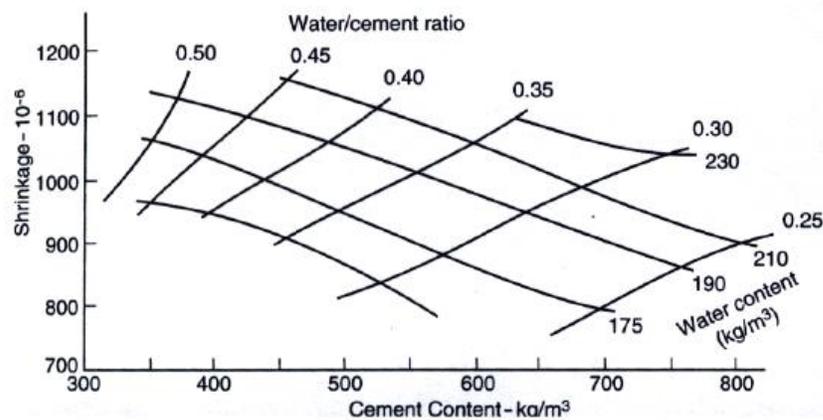
**Relación entre la retracción y el contenido del agregado %**

Fuente: “Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental”, tomado de García.

En lo concerniente al tamaño del agregado se dice que, a mayor tamaño máximo mayor será el contenido de agregado y debido a ello menor será el contenido de pasta, dando como resultado menor retracción, sin embargo, se tendrá hormigones menos trabajables (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

El aumento del contenido de agua o el cemento va ir ligada a un aumento de la retracción, esta relación se puede observar en la fig. 2.8. (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

Fig. 2.8.

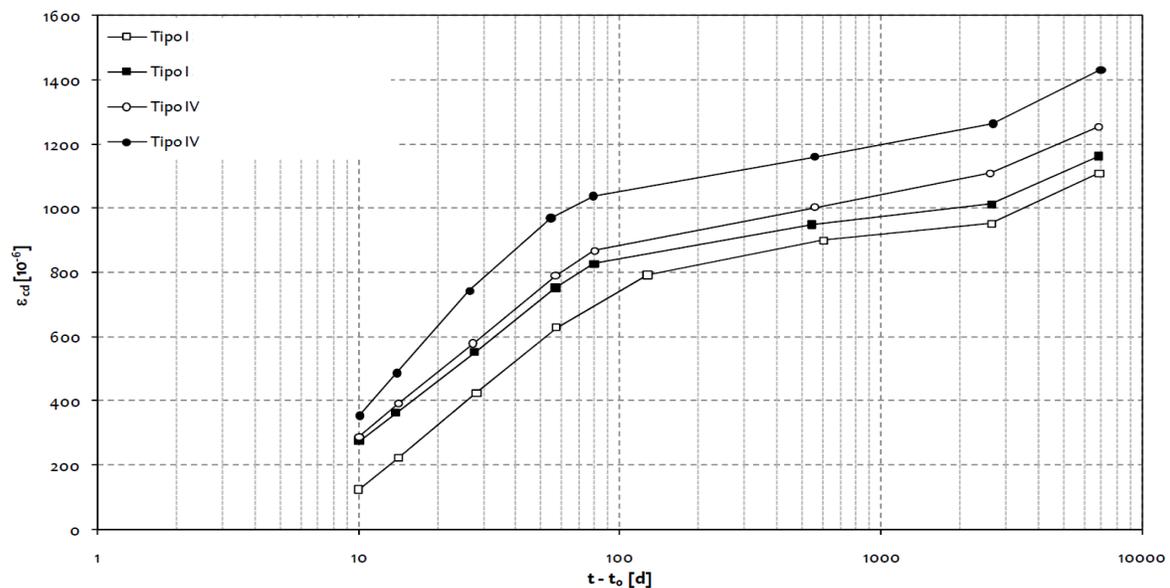
**Relación entre el contenido de agua, cemento y relación a/c con la retracción**

Fuente: “fisuras por retracción en el Hormigón”, tomado de Cedeño et al.

Troxell (1958, citado por García, 2011) realizó un estudio el cual estaba enfocado en ver la influencia del tipo de cemento y la finura de su molido durante un periodo de 24 años, los cementos que usó en su estudio fueron el tipo I, normal y el tipo IV de bajo calor de hidratación, estos resultados se pueden apreciar en la fig. 2.9.

**Fig. 2.9.**

***Retracción por secado para probetas cúbicas utilizando cementos tipo I y IV***



Fuente: “Estudio de reetracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental”, tomado de García.

Como se pudo observar en la fig. 2.9. la reetracción por secado para el cemento tipo IV con bajo calor de hidratación, es mayor comparada con el cemento normal tipo I, esto es debido a que el cemento Tipo IV desarrolla una hidratación más rápida que el cemento normal, generando una capa de material sólido alrededor del cemento lo cual provoca una reetracción incompleta entre el cemento y el agua (García E. , 2011).

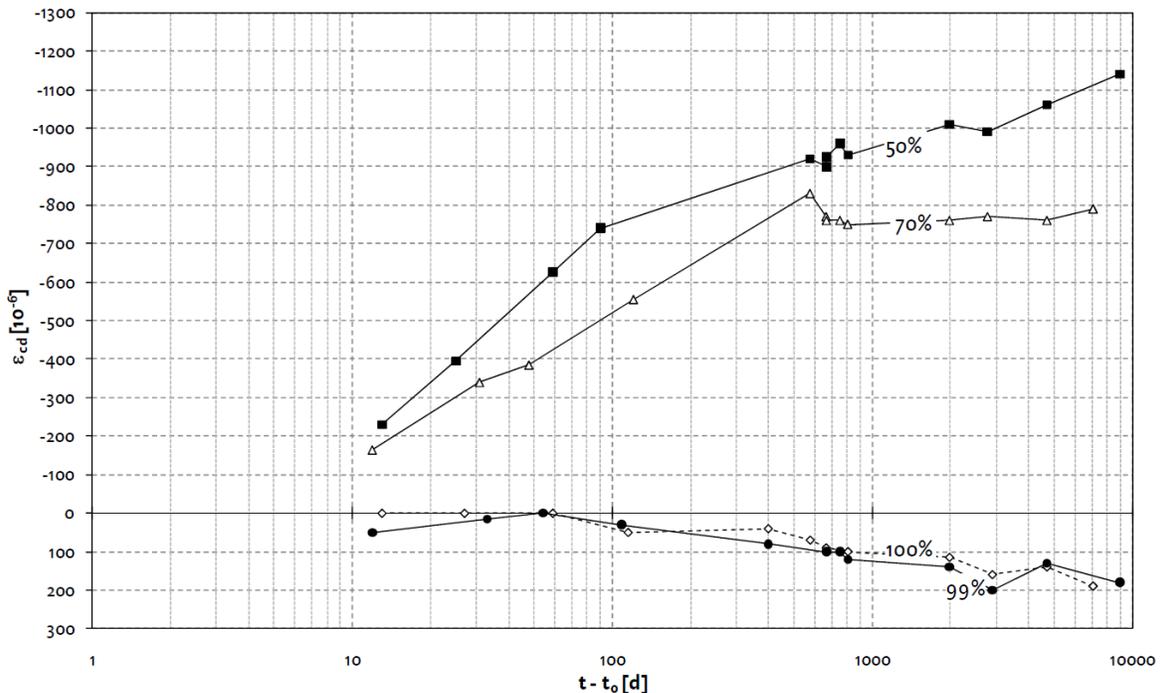
### **2.8.2. Factores relacionados con el ambiente**

Uno de los factores que tiene más influencia en la reetracción es la humedad relativa y temperatura debido a que cuando esas condiciones son elevadas llegan a provocar fisuras en la superficie (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

Estudios realizados por Troxell, Raphael y Davis (1958, citado por García, 2011) contrastaron el efecto de la humedad relativa, demostrando que cuanto menor es la humedad relativa mayor es la retracción última y como consecuencia también lo es la velocidad de retracción como se puede apreciar en la Fig. 2.10.

**Fig. 2.10.**

***Relación entre la retracción versus el tiempo bajo condiciones de almacenaje constantes de humedad relativa curadas durante 28 días (Troxell, Raphael y Davis 1958)***



Fuente: “Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental”, tomado de García.

### 2.8.3. Factores relacionados con el método de ejecución

Entre estos factores se tiene: el tiempo de curado, tipo de curado, tamaño y forma del elemento (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

Para que un hormigón llegue a las resistencias deseadas es necesario un adecuado curado, pero el curado no solo llega a influir en la adquisición de las resistencias, sino que también influye en el desarrollo de la retracción (García E., 2011).

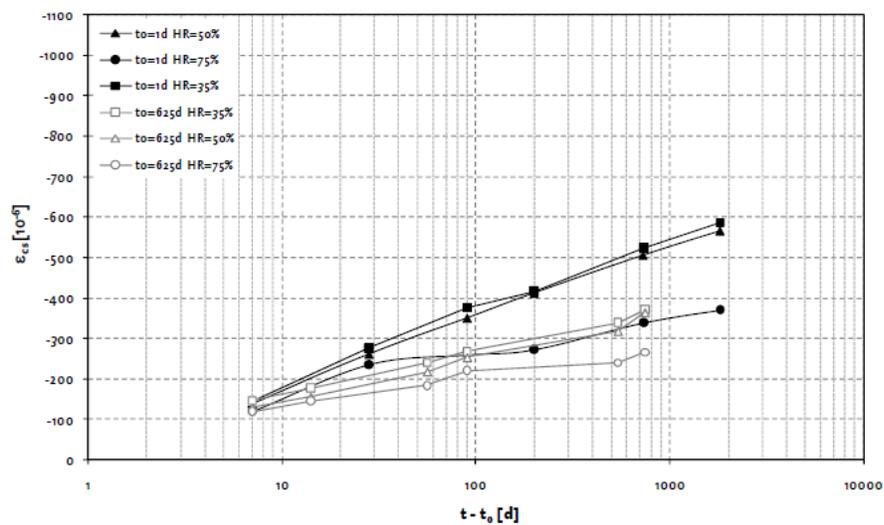
Estudios realizados por Verbeck y Helmuth (citado por García, 2011) demostraron que aquellas probetas con mayor periodo de curado, llegan a desarrollar una menor retracción

comparadas con aquellas que se curan con menor tiempo, la conclusión a la que llegaron es que cuando el hormigón empieza a adquirir resistencia las probetas que se curan durante más tiempo tienen más agua libre a la que pueden recurrir para la reacción de la hidratación y aquel hormigón que no tuvo un curado adecuado recurren a sus reservas de agua.

En la fig. 2.11 se puede observar los efectos del curado sobre la retracción.

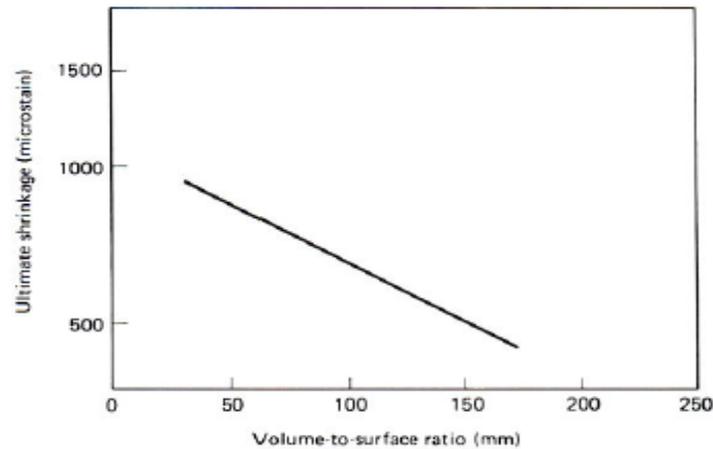
**Fig. 2.11.**

*Retracción del hormigón con periodos de curado de 1 o 625 días, sometidas a diferentes humedades relativas*



Fuente: “Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental”, tomado de García.

El tamaño del elemento tiene gran influencia sobre la retracción, pues cuando los elementos son pequeños la retracción será mayor y por el contrario cuanto mayor sea el tamaño menor será la retracción (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

**Fig. 2.12.*****Efecto de la relación volumen/superficie***

Fuente: “fisuras por retracción en el Hormigón”, tomado de Cedeño et al.

El efecto de la forma del elemento estructural también influye sobre la retracción, pero su influencia es secundaria, Piezas con la misma relación volumen/superficie, pero en forma de I, manifiestan menor retracción que piezas cilíndricas. Estas diferencias están relacionadas con la distancia que el agua tiene que recorrer hasta la superficie (Cedeño, Cuellar, & Izurieta, 2009).

### **2.9. Modelos de estimación que considera el comité ACI 209.2R-08**

Aunque es difícil estimar a ciencia cierta las deformaciones que el hormigón tendrá, ya que este fenómeno es el resultado varios procesos físicos que dependen de otras variables, con el pasar de los años se desarrollaron algunos modelos para calcular la retracción del hormigón, los cuales son empíricos y solo reflejan algunos de los procesos físicos de este fenómeno, por lo que consecuentemente, al pronosticar la retracción a largo plazo es de esperar un coeficiente de variación de 20% o más (Comité ACI 209 2R, 2008).

A pesar de que la retracción ha sido estudiada desde hace varios años, no ha habido un acuerdo sobre qué información debe ser necesaria para determinar la retracción, como ser las propiedades mecánicas del hormigón que se necesita al momento de su diseño, por ello el comité ACI 209 2R recomienda como mínimo que los modelos de predicción deben tener la siguiente información:

- Descripción del hormigón, como ser las propiedades mecánicas del hormigón como ser la resistencia.
- Humedad ambiental
- Duración del curado
- Tamaño de la pieza

De lo indicado en lo anterior el comité ACI 209 2R selecciono los siguientes modelos: ACI 209R-92 (comité ACI 209 1992), el modelo de Bazant-Baweja B3 desarrollado por Bazant y Baweja (1995, 2000), el código de modelos CEB 1990-1999 (CEB MC90-99) desarrollado por Muller y Hillsdorf 1990 y la GL2000 desarrollad por Gardner y Lockman (2001); en la tabla 2.1. se puede apreciar los parámetros de cada modelo (Comité ACI 209 2R, 2008)

**Tabla 2.1.**  
***Parámetros de los modelos predictivos según ACI 209***

Variable de entrada	Modelo			
	ACI 209R-92	Bazant-Baweja B3	CEB MC90-99	GL2000
$F_{cm28}, MPa$	-	17 a 70	15 a 120	16 a 82
a/c (relación árido/cemento)	-	2,5 a 13,5	-	-
Contenido de cemento, $Kg/m^3$	279 a 446	160 a 720	-	-
w/c (relación agua/cemento)	-	0,35 a 0,85	-	0,40 a 0,60
Humedad relativa, %	40 a 100	40 a 100	40 a 100	40 a 100
Tipo de cemento, Europeo (EE.UU.)	R o RS (I, III)	R, SL, RS (I, II, III)	R, SL, RS (I, II, III)	R, SL, RS (I, II, III)
$t_c$ (curado en húmedo)	$\geq 1$ día	$\geq 1$ día	$\leq 14$ días	$\geq 1$ día
$t_c$ (curado al vapor)	1 a 3 días	-	-	-
$t_o$	$\geq 7$ días	$t_o \geq t_c$	$> 1$ día	$> 1$ día

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209

### 2.9.1. Modelo ACI 209R-92

Modelo desarrollado en 1971 por Branson y Christiason, con ligeras modificaciones en 1992, desde entonces no se ha actualizado y es utilizado para comparaciones recientes y utilizado en el diseño de estructuras durante muchos años (Comité ACI 209 2R, 2008)

En su nivel más básico el modelo ACI 209R-92 requiere de los siguientes aspectos (Comité ACI 209 2R, 2008):

- ✓ La edad del hormigón cuando inicia el proceso de secado, que es la edad al final del curado húmedo.
- ✓ Método de curado.
- ✓ La humedad relativa expresada en decimales.
- ✓ Relación volumen-superficie.
- ✓ Tipo de cemento.
- ✓ Contenido de cemento.

La retracción por secado se calcula con la Ec. 2.1.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} * \varepsilon_{shu} \text{ (Ec. 2.1.)}$$

Donde  $f$  (en días) y  $\alpha$  son constantes para una forma y miembro dado,  $\varepsilon_{shu}$  es la deformación de contracción final, y  $t - t_c$  es el tiempo desde el final del curado inicial (Comité ACI 209 2R, 2008).

Para condiciones estándar, cuando hay la ausencia de datos de contracción específicos de los agregados y condiciones locales y a una humedad relativa de 40%, el valor medio sugerido para para la contracción final  $\varepsilon_{shu}$  es (Comité ACI 209 2R, 2008):

$$\varepsilon_{shu} = 780 * 10^{-6} \text{ mm/mm}$$

Para la relación de tiempo  $f$  de la ecuación 2.1. recomiendan un valor de 35 y 55 hasta 7 días de curado húmedo y de 1 a 3 días de curado al vapor, respectivamente, se sugiere un valor de 1 para  $\alpha$  cabe destacar que la relación de tiempo no hace distinción alguna entre retracción por secado, autógena y por carbonatación (Comité ACI 209 2R, 2008).

Para condiciones distintas a las condiciones estándares el valor medio de la retracción última  $\epsilon_{shu}$  tiene que ser afectado por un factor de corrección  $\gamma_{sh}$  que se subdividen en 7 factores de corrección dependiendo de las condiciones particulares como se muestra en la Ec. 2.2 (Comité ACI 209 2R, 2008).

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,t_c} * \gamma_{sh,RH} * \gamma_{sh,vs} * \gamma_{sh,s} * \gamma_{sh,\Psi} * \gamma_{sh,c} * \gamma_{sh,\alpha} \quad (Ec. 2.2.)$$

El valor de  $\gamma_{sh}$  representa el producto acumulado de todos los factores de corrección.

- El coeficiente  $\gamma_{sh,t_c}$  es el coeficiente de curado inicial para tiempos diferentes a partir de 7 días de curado húmedo, como se ve en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.**

***Factores de corrección para curado húmedo***

Duración de curado húmedo $t_c$ , <i>días</i>	$\gamma_{sh,t_c}$
1	1,20
3	1,10
7	1,00
14	0,93
28	0,86
90	0,75

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209

- El coeficiente de humedad relativa ambiental  $\gamma_{sh,RH}$  se obtiene con la Ec. 2.3.

$$\gamma_{sh,RH} = \begin{cases} 1,40 - 1,02h & \text{para } 0,40 \leq h \leq 0,80 \\ 3,00 - 3,00h & \text{para } 0,80 \leq h \leq 1,00 \end{cases} \quad (Ec. 2.3.)$$

El valor de la humedad relativa  $h$  es en decimales; para humedades relativas menores al 40%, se deben utilizar valores superiores a 1, debido a que  $\gamma_{sh,RH} = 0$  cuando  $h = 100\%$

- El coeficiente  $\gamma_{sh,vs}$  para miembros con relación de volumen-superficie de 38mm o espesor medio distinto de 150 mm, el espesor medio se define como cuatro veces la

relación volumen-superficie es decir  $d=4V/S$ , para dichas condiciones se utiliza la Ec. 2.4.

$$\gamma_{sh,vs} = 1,20e^{\{-0,00472*\left(\frac{V}{S}\right)\}} \quad (Ec. 2.4.)$$

Donde V es el volumen de la muestra en  $mm^3$  y S es el área de superficie de la muestra en  $mm^2$ .

Para espesor medio del elemento de menos de 150 mm o una relación volumen superficie de menos de 37,5 mm se debe utilizar los valores de la tabla 2.3.

**Tabla 2.3.**

***Factores de corrección para la relación volumen superficie***

Espesor medio de miembro d, mm	Relación volumen superficie V/S, mm	Factor de retracción
51,00	12,50	1,35
76,00	19,00	1,25
102,00	25,00	1,17
127,00	31,00	1,08
152,00	37,50	1,00

Fuente: "Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido", tomado de Comité ACI 209

Para espesor medio de los miembros de más de 150 mm hasta aproximadamente 300 a 380 mm se debe utilizar la Ec. 2.5 y 2.6

Durante el primer año de secado,  $t - t_c \leq 1$  año

$$\gamma_{sh,d} = 1,23 - 0,0015d \quad Ec. 2.5.$$

$$\gamma_{sh,d} = 1,23 - 0,006 \left(\frac{V}{S}\right)$$

Para los valores finales,  $t - t_c > 1$  año

$$\gamma_{sh,d} = 1,17 - 0,00114d$$

Ec. 2.6.

$$\gamma_{sh,d} = 1,17 - 0,00456 \left( \frac{V}{S} \right)$$

Donde  $d=4V/S$

- Factor de asentamiento  $\gamma_{sh,s}$  donde  $s$  es el asentamiento del hormigón fresco en mm, se obtiene con la Ec. 2.7.

$$\gamma_{sh,s} = 0,89 + 0,00161s \text{ (Ec. 2.7.)}$$

- Factor de agregado fino  $\gamma_{sh,\Psi}$ , donde  $\Psi$  es la relación agregado fino respecto al total de áridos en peso, expresada como porcentaje, se obtiene con la Ec. 2.8.

$$\gamma_{sh,\Psi} = 0,30 + 0,014\Psi \text{ para } \Psi \leq 50\%$$

$$\gamma_{sh,\Psi} = 0,90 + 0,002\Psi \text{ para } \Psi > 50\%$$

Ec. 2.8.

- Factor de contenido de cemento  $\gamma_{sh,c}$ , donde  $c$  es el contenido de cemento en  $\text{Kg/m}^3$

$$\gamma_{sh,c} = 0,75 + 0,00061c \text{ (Ec. 2.9.)}$$

- Factor de contenido de aire  $\gamma_{sh,\alpha}$ , donde  $\alpha$  es el contenido de aire en porcentaje, se obtiene con la Ec. 2.10.

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0,95 + 0,008\alpha \geq 1 \text{ (Ec. 2.10.)}$$

### 2.9.2. Modelo Bažant-Baweja B3

Este modelo es la última variante de una serie de modelos de predicción de la retracción, desarrollado por Bažant y sus colaboradores de la universidad de Northwestern, de acuerdo con Bažant y Baweja el modelo B3 es más sencillo y es el mejor justificado teóricamente que los otros modelos, los parámetros necesarios son (Comité ACI 209 2R, 2008):

- ✓ Edad del hormigón cuando el secado inicia, generalmente se lo toma como la edad al final del curado húmedo en días.
- ✓ Contenido de agregado en el hormigón en  $\text{Kg/m}^3$ .
- ✓ Contenido de cemento en el hormigón en  $\text{Kg/m}^3$ .
- ✓ Contenido de agua en el hormigón en  $\text{Kg/m}^3$ .
- ✓ Tipo de cemento.

- ✓ Condición de curado.
- ✓ Humedad relativa expresada en decimales.
- ✓ Relación volumen superficie.

La retracción por secado se calcula con la Ec. 2.11.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = -\varepsilon_{sh\infty} K_h S_{(t,t_c)} \quad (Ec. 2.11.)$$

Donde  $\varepsilon_{sh\infty}$  es la tensión de retracción final,  $K_h$  es el factor de dependencia de la humedad que se obtiene de la tabla 2.4.,  $S_{(t,t_c)}$  es el tiempo desde el final del curado inicial.

**Tabla 2.4.**  
**Dependencia de la humedad  $K_h$**

Humedad relativa	$K_h$
$h \leq 0,98$	$1-h^3$
$h=1,00$	$-0,20$
$0,98 < h < 1,00$	Interpolación lineal: 12,74-12,94h

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209

La retracción final  $\varepsilon_{sh\infty}$  se calcula con la Ec. 2.12.

$$\varepsilon_{sh\infty} = -\varepsilon_{s\infty} \frac{E_{cm607}}{E_{cm(t_c+\tau_{sh})}} \quad (Ec. 2.12.)$$

Donde  $\varepsilon_{s\infty}$  es una constante que se calcula con la Ec. 2.13., y  $E_{cm607}/E_{cm(t_c+\tau_{sh})}$  es un factor que tiene en cuenta la dependencia temporal de la retracción final, calculada con la Ec. 2.14.

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 [0,019 w^{2,10} f_{cm28}^{-0,28} + 270] \times 10^{-6} \quad (Ec. 2.13.)$$

$$E_{cmt} = E_{cm28} \left( \frac{t}{4 + 0,85t} \right)^{0,50} \quad (Ec. 2.14.)$$

$$E_{cm28} = 4734 \sqrt{f_{cm28}}$$

Donde “w” es el contenido de agua en kg/m<sup>3</sup>,  $f_{cm28}$  es la resistencia media a la compresión del hormigón a 28 días en MPa, y  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes relacionadas con el tipo de cemento y las condiciones de curado.

(Nota: el signo negativo es la convención de los autores del modelo).

Los valores de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  se obtienen de la tabla 2.5. y 2.6. respectivamente, esto significa que

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \text{ para } t_c = 7 \text{ días, y } \tau_{sh} = 600 \text{ días}$$

**Tabla 2.5.**

**$\alpha_1$  en función del tipo de cemento**

Tipo de cemento	$\alpha_1$
Tipo I	1,00
Tipo II	0,85
Tipo III	1,10

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209

**Tabla 2.6.**

**$\alpha_2$  en función de la condición de curado**

Tipo de cemento	$\alpha_1$
Curado al vapor	0,75
Curado en agua o con una humedad relativa del 100%.	1,00
Curado normal al aire con protección inicial contra el secado	1,20

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209

La función de tiempo para la contracción  $S_{(t,t_c)}$  está dada por la Ec. 2.15.

$$S_{(t,t_c)} = \tanh \sqrt{\frac{(t - t_c)}{\tau_{sh}}} \quad (\text{Ec. 2.15.})$$

Donde  $t$  y  $t_c$  son la edad del hormigón y la edad de secado iniciado o el final del curado húmedo en días, respectivamente, y  $\tau_{sh}$  es el tiempo medio de retracción en días, que se obtiene con la Ec.2.16.

$$\tau_{sh} = 0,085t_c^{-0,08} f_{cm28}^{-0,25} \left[ 2K_s \left( \frac{V}{S} \right) \right]^2 \quad (Ec. 2.16.)$$

donde  $K_s$  es el factor de corrección de la forma de la sección transversal, que se obtiene de la tabla 2.7., y  $V/S$  es la relación volumen-superficie en mm.

**Tabla 2.7.**

***K<sub>s</sub> Coeficiente en función de la sección transversal***

Forma de la sección transversal	$K_s$
Placa infinita	1,00
Cilindro infinito	1,15
Prisma cuadrado infinito	1,25
Esfera	1,30
cubo	1,55

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209.

Nota: el analista debe estimar cuál de estas formas se aproxima mejor a la forma real forma del miembro o de la estructura. No es necesario una gran precisión de este respecto,  $K_s \approx 1$  puede utilizarse para un análisis simplificado.

### 2.9.3. Modelo CEB MC90-99

El enfoque de la retracción de este modelo incluye mejoras a su anterior versión CEM MC90, desarrollado para hormigones normales y de altas resistencias, considera que una separación de la retracción total en autógena y de secado, debiéndose realizar ajustes para esta última ya que este modelo debe abarcar tanto en la retracción de hormigón normal como de altas resistencias (Comité ACI 209 2R, 2008).

La retracción total se calcula con la Ec.2.17.

$$\varepsilon_{sh}(t - t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c) \quad Ec. 2.17.$$

Donde  $\varepsilon_{sh}(t - t_c)$  es la retracción total,  $\varepsilon_{cas}(t)$  es la retracción autógena y  $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$  es la retracción por secado a la edad  $t$  (días) del hormigón después de inicio de secado en  $t_c$  (días).

De la ecuación 2.22. únicamente se determinará la retracción por secado, debido a que es el objeto de estudio, se calcula con la Ec. 2.18.

$$\varepsilon_{cds}(t, t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28})\beta_{RH}(h)\beta_{ds}(t - t_c) \text{ Ec. 2.18.}$$

Donde  $\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$  es el coeficiente de retracción por secado nocional que se calcula con la Ec. 2.19.,  $\beta_{RH}(h)$  es el coeficiente que toma en cuenta el efecto de la humedad relativa calculada con la Ec. 2.20.a o 2.20.b, y  $\beta_{ds}(t - t_c)$  es la función que describe el desarrollo temporal de la retracción por secado calculada con la ecuación 2.21.

$$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = \left[ (220 + 110\alpha_{ds1}) \left( \frac{-\alpha_{ds2}f_{cm28}}{f_{cm0}} \right) \right] * 10^{-6} \text{ Ec. 2.19.}$$

$$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_0} \right)^3 \right] \text{ para } 0,40 \leq h < 0,99\beta_{s1} \text{ Ec. 2.20. a}$$

$$\beta_{RH}(h) = 0,25 \text{ para } h \geq 0,99\beta_{s1} \text{ Ec. 2.20. b}$$

$$\beta_s(t - t_c) = \left[ \frac{\frac{(t - t_c)}{t_1}}{350 \left[ \frac{\left( \frac{V}{S} \right)}{\left( \frac{V}{S} \right)_o} \right]^2 + \frac{(t - t_c)}{t_1}} \right]^{0,50} \text{ Ec. 2.21.}$$

Donde  $\alpha_{ds1}$  y  $\alpha_{ds2}$  son coeficientes que dependen del tipo de cemento que se obtienen de la tabla 2.8.,  $\beta_{s1}$  es un coeficiente que toma en cuenta la auto desecación del hormigón debido a altas resistencias,  $h$  es la humedad relativa del ambiente en decimal,  $h_0 = 1$ ,  $V/S$  es la relación de volumen superficie en mm,  $(V/S)_o = 50 \text{ mm}$ ,  $f_{cm28} = 10 \text{ MPa}$ ,  $t_c$  es la edad del hormigón al inicio del secado (días), y  $(t - t_c)$  es la duración del secado (días).

**Tabla 2.8.**  
**coeficientes  $\alpha_{ds1}$  y  $\alpha_{ds2}$**

Tipo de cemento	$\alpha_{as}$	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
SL (cemento de endurecimiento lento)	800	3	0,13
N y R (cemento de endurecimiento normal o rápido)	700	4	0,12
RS (cemento de endurecimiento rápido de alta resistencia)	600	6	0,12

Fuente: "Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido", tomado de Comité ACI 209.

#### 2.9.4. Modelo GL2000

Es un modelo influenciado por CEB MC90, este modelo es elaborado para para hormigones de resistencias normales, como los hormigones con resistencias a la compresión menores a 82 MPa, los parámetros necesarios para el uso de este modelo son (Comité ACI 209 2R, 2008):

- ✓ Edad del hormigón cuando se inicia el secado, se toma como la edad del hormigón cuando termina el periodo de curado húmedo.
- ✓ Resistencia a la compresión a los 28 días.
- ✓ Humedad relativa expresada en decimales.
- ✓ Relación volumen-superficie en mm

La retracción se lo calcula con la Ec. 2.22.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{shu} \beta(h) \beta(t - t_c) \text{ Ec. 2.22.}$$

Donde  $\varepsilon_{shu}$  es la deformación de retracción final,  $\beta(h)$  es un factor de corrección debido a la humedad, y  $\beta(t - t_c)$  es un término de corrección para el efecto del tiempo de secado.

La retracción final se calcula con la Ec. 2.23.

$$\varepsilon_{shu} = 900k \left( \frac{30}{f_{cm28}} \right)^{1/2} * 10^{-6} \text{ Ec. 2.23.}$$

Donde  $f_{cm28}$  es la resistencia media a la compresión del hormigón a 28 días en MPa, y k es una constante de retracción que depende del tipo de cemento que se obtiene de la tabla 2.9.

**Tabla 2.9.**  
**Parámetro de k en función del tipo de cemento**

Tipo de cemento	k
Tipo I	1,00
Tipo II	0,75
Tipo III	1,15

Fuente: “Guía para modelado y cálculo de retracción y fluencia en el hormigón endurecido”, tomado de Comité ACI 209.

El factor de corrección debido a la humedad se calcula con la Ec. 2.24.

$$\beta(h) = (1 - 1,18h^4) \text{ Ec. 2.24.}$$

El comité ACI 209 indica que para una humedad relativa de 0,96 no habrá un encogimiento.

El término de corrección para el efecto del tiempo de secado  $\beta(t - t_c)$  se calcula con la Ec. 2.25.

$$\beta(t - t_c) = \left[ \frac{(t - t_c)}{(t - t_c) + 0,12 \left(\frac{V}{S}\right)^2} \right]^{1/2} \text{ Ec. 2.25.}$$

donde t y  $t_c$  son la edad del hormigón y la edad de inicio del secado o de fin del curado húmedo en días, respectivamente, y V/S es la relación volumen-superficie en mm.

## **2.10. Materiales empleados en la elaboración de hormigones**

### **2.10.1. Agua**

Es un elemento indispensable y fundamental en la elaboración del hormigón, tiene una relación directa con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del hormigón en su estado endurecido (Díaz, 2005).

## **2.10.2. Agregados**

Son materiales que se combinan con los aglomerantes (cemento, cal, etc.) y el agua formando los hormigones o morteros. La importancia de los agregados radica en que constituyen u 65% a 80% del volumen de la unidad cubica de hormigón (Díaz, 2005).

### **2.10.2.1. Clasificación de los agregados**

#### **2.10.2.1.1. Agregado grueso**

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz de 4,75 mm (N° 4 s/g ASTM C-33) hasta la dimensión de los fragmentos más grandes que contiene, cuya magnitud define el tamaño máximo del agregado (Díaz, 2005).

#### **2.10.2.1.2. Agregado fino**

Se considera como agregados finos a las arenas o piedras naturales finamente trituradas, de dimensiones reducidas, que pasen el tamiz de 9,5 mm (3/8”), que abarcan nominalmente partículas entre 0,075 mm (N° 200 s/g ASTM C-33) a 4,75 mm (Díaz, 2005).

### **2.10.2.2. Propiedades físicas y mecánicas de los agregados**

#### **2.10.2.2.1. Granulometría de los agregados**

La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas de los agregados. La importancia de esta radica en que de ella va depender manejabilidad y economía de una mezcla de hormigón. Emplear agregados con granulometría continua, es conveniente tanto en la economía como en la manejabilidad, la experiencia a demostrados que a igualdad de consumo de pasta de cemento con granulometrías continuas se llegan a obtener hormigones más manejables durante su mezclado (Díaz, 2005).

La distribución del tamaño de las partículas se realiza por una separación de las mismas con una serie de mallas normalizadas como se puede ver en la tabla 2.10.

**Tabla 2.10.*****Serie de mallas estándar y límites de tolerancia para la Arena***

Designación ASTM C-33	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa	
		Límite inferior	Límite superior
3/8"	9,50	100	100
N° 4	4,75	95	100
N° 8	2,36	80	100
N° 16	1,18	45	80
N° 30	0,60	25	60
N° 50	0,30	10	30
N° 100	0,15	2	10

Fuente: "ASTM C-33", tomado de especificación normalizada para agregados en el concreto.

**2.10.2.2.2. Módulo de finura de los agregados**

Es un índice aproximado del tamaño medio de los agregados. Cuando este índice es bajo quiere decir que el agregado es fino, cuando es alto indica lo contrario. Este índice, no distingue granulometrías, pero en caso de agregados que estén dentro de los porcentajes especificados en las normas granulométricas, sirve para controlar la uniformidad de los mismos. En el caso del agregado fino se prefiere que el módulo de finura no sea menor a 2,30 pues se trataría de arenas muy finas ni mayor a 3,10 pues sería arenas muy gruesas (Díaz, 2005).

El módulo de finura del agregado grueso es menos usado que el de la arena, por lo que no se hará mayores comentarios sobre este (Díaz, 2005).

**2.10.2.2.3. Tamaño máximo**

El tamaño máximo de las partículas se identifica con la malla de menor abertura en que alcanza a pasar efectivamente el total de las partículas del conjunto, cuando se le criba sucesivamente en mallas cuyas aberturas se incrementan gradualmente. La determinación del tamaño máximo es necesario cuando se analizan granulométricamente muestras de depósito natural a fin de conocer el tamaño máximo disponible en el depósito (Díaz, 2005).

#### **2.10.2.2.4. Tamaño máximo nominal**

El tamaño máximo nominal de las partículas se define como el siguiente tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más, en muchos casos el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal pueden no coincidir lo cual resulta perfectamente lógico debido a que este último indica el promedio de partículas más grandes en su fracción gruesa mientras que el primero tan solo da una idea de las partículas más grandes que pueda ser no solo una (Díaz, 2005).

#### **2.10.2.2.5. Peso específico de los agregados**

Generalmente, los agregados tienen poros que pueden ser accesibles o abiertos y en comunicación con el exterior e inaccesibles, cerrados y aislados del exterior, esto hace que no se pueda hablar de un solo peso específico del agregado, sino de varios, que va depender de que se incluya o no estos tipos de poros en el volumen que se esté considerando (Díaz, 2005).

La norma ASTM C127-81 define el peso específico de los agregados de la siguiente manera:

Peso específico de un agregado. - es la relación entre peso, al aire, de sus partículas minerales y el peso al aire de agua destilada, considerando una misma temperatura. Se puede distinguir tres tipos de peso específico: a granel, saturado superficialmente seco y el aparente (Díaz, 2005).

#### **2.10.2.2.6. Porosidad y absorción de los agregados**

La porosidad de un cuerpo sólido es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, incluyendo vacíos, y se expresa como porcentaje en volumen (Díaz, 2005).

De acuerdo a Díaz (2005) la medición de la porosidad de las rocas suele requerir de procedimientos relativamente complicados, por cuyo motivo no es una característica que se acostumbra a determinar en los agregados; sin embargo, es posible tener una idea aproximada de la porosidad de los agregados inmediatamente la determinación de su capacidad de absorción de agua.

La absorción se define como el incremento en la masa de un cuerpo sólido poroso, como resultado de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables. En el caso de los

agregados, la absorción se determina después de un periodo de inmersión de 24 horas en agua, conforme al método ASTM C127 y C128 (Díaz, 2005).

#### **2.10.2.2.7. Peso unitario de los agregados**

El peso unitario es la relación entre el peso de un material y volumen ocupado por el mismo en el recipiente. Dependiendo del sistema que se emplee en acomodar el material, e pueden tener dos valores: el peso unitario suelto y el peso unitario compactado (Díaz, 2005).

El peso unitario es un factor que mide la aptitud del agregado para ser utilizado en la producción de hormigón, según las normas, los agregados son considerados aptos si tiene un peso unitario entre 1,20 y 1,75 gr/cm<sup>3</sup> (Díaz, 2005).

#### **2.10.2.2.8. Resistencia a compresión**

Normalmente las partículas de los agregados tienen una resistencia superior a la de la pasta endurecida, de tal manera, que cuando el agregado falla antes que la pasta, la resistencia del agregado toma importancia (Díaz, 2005).

### **2.10.3. Cemento Portland**

Se llama cemento Portland al producto que se obtiene de la pulverización del producto llamado Clinker esencialmente es un Clinker finamente molido, producido por la cocción a elevadas temperaturas de mezclas que contienen cal, sílice, alúmina y óxido de hierro en proporciones determinadas (Sánchez, 2009).

El cemento constituye entre el 7 al 15 % del volumen total del hormigón; es el componente activo de la mezcla y por tanto influye en todas las características (Sánchez, 2009).

#### **2.10.3.1. Composición química del cemento**

Las materias primas usadas en la fabricación del cemento Portland llegan a interactuar en un horno hasta alcanzar un estado de equilibrio químico para formar una serie de compuestos, cuyas variaciones relativas determinan los diferentes tipos de cemento portland, estos compuestos químicos se pueden visualizar en la tabla 2.11. (Sánchez, 2009).

**Tabla 2.11.**  
***Compuestos del Cemento Portland***

Compuesto	Formula Química	Abreviatura Usada
Silicato tricálcico	$3 \text{ Ca O Si O}_2$	$\text{C}_3 \text{ S}$
Silicato dicálcico	$2 \text{ Ca O Si}_2$	$\text{C}_2 \text{ S}$
Aluminato tricálcico	$2 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3$	$\text{C}_3 \text{ A}$
Ferro Aluminato tetracálcico	$4 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3 \text{ fe}_2 \text{ O}_3$	$\text{C}_4 \text{ a F}$

Fuente: “Manual de Tecnología del Concreto” Tomo I. tomado de Sánchez Luis A.

Los compuestos  $\text{C}_3 \text{ S}$  y  $\text{C}_2 \text{ S}$  forman del 70 al 80% del cemento portland son los más estables y los que más contribuyen a la resistencia del cemento (Díaz, 2005).

El  $\text{C}_3 \text{ S}$  se hidrata más rápidamente que el  $\text{C}_2 \text{ S}$  y por lo tanto contribuyen al tiempo de fraguado y a la resistencia inicial. Su acción hidratadora está comprendida entre 24 horas y los 7 días, llegando a provocar el endurecimiento normal de la pasta de cemento y su elevada resistencia al séptimo día (Díaz, 2005).

La contribución de la resistencia del  $\text{C}_2 \text{ S}$  toma lugar muy lentamente; su acción endurecedora está comprendida entre los 7 y 28 días y pueden continuar por encima de un año (Díaz, 2005).

El  $\text{C}_3 \text{ A}$  se hidrata rápidamente y genera mucho calor solamente contribuye a la resistencia las 24 horas y es el menos estable de los componentes del cemento. Además, se le da al concreto propiedades indeseables, tales como cambios volumétricos y baja resistencia a los sulfatos (Díaz, 2005).

El  $\text{C}_4 \text{ a F}$  cumplen la función de catalizador y aporta poca resistencia al concreto (Díaz, 2005).

### **2.10.3.2. Características físicas y mecánicas del cemento portland**

Las características físicas y mecánicas más importantes son: finura de molido, peso específico y resistencia a compresión (Sánchez, 2009).

#### **2.10.3.2.1. Finura de molido**

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y el primer endurecimiento. Si los granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy

pequeño, Al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte; por el contrario, si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado serían muy altos, lo que en general resulta perjudicial (Sánchez, 2009).

#### **2.10.3.2.2. Peso específico**

El peso específico es la relación entre la muestra de cemento y el volumen absoluto; su valor debe estar entre 3,10 a 3,15 gr/cm<sup>3</sup>. El valor del peso específico no indica la calidad de un cemento, sino que su valor es usado para el diseño de la mezcla. Con el calor del peso específico se pueden encontrar otras características del hormigón (Sánchez, 2009).

El peso específico real varía muy poco de unos cementos a otros y la limitación establecida por algunas normas (igual o superior a 3 gr/cm<sup>3</sup>) se cumple prácticamente siempre (Sánchez, 2009).

#### **2.10.3.2.3. Resistencias mecánicas**

Es una de las propiedades más importantes de cemento en su estado endurecido en cuando a los requisitos estructurales. Aunque las resistencias deberían ser medidas en pruebas sobre la pasta de cemento puro, esta no se hace debido a la dificultad que tiene al ser modelada dando origen a una gran variación en los resultados (Sánchez, 2009).

#### **2.10.3.3. Clasificación del cemento**

La norma ASTM C-150 especifica lo siguiente para poder clasificar a los cementos:

- **Tipo I:** Cemento común, su uso es de manera general. Para hormigones que no sufran ataques ambientales ni biológicos (Sánchez, 2009).
- **Tipo II:** Cemento con moderada resistencia a los sulfatos, generalmente se lo utiliza en estructuras de drenaje donde sus aguas no sean demasiado severas (Sánchez, 2009).
- **Tipo III:** Cemento de alta resistencia inicial, proporciona resistencias elevadas en un corto periodo de tiempo, su aplicación puede ser en encofrados donde se necesite su retiro pronto (Sánchez, 2009).

- **Tipo IV:** Bajo calor de hidratación, se utiliza en ambientes donde se necesite mantener una baja cantidad y velocidad de calor, para estructuras de hormigón masivo, como grandes presas (Sánchez, 2009).
- **Tipo V:** Alta resistencia a los sulfatos, se usa generalmente en hormigones que están expuestos a severos ataques de sulfatos como son las aguas freáticas (Sánchez, 2009).
- **Tipos IA, IIA y IIIA:** Cementos inclusores de aire, se asemejan a los cementos tipo I, II y III, pero a diferencia de estos durante su fabricación se añade un agente inclusor de aire, su uso brinda protección contra la congelación y el proceso de deshielo (Sánchez, 2009).

De acuerdo a Sánchez, (2009) para los cementos hidráulicos mezclados la norma ASTM C-595 reconoce los siguientes:

- **Tipo IS:** Cemento portland con escoria de alto horno.
- **Tipo IP:** Cemento portland con adición puzolana.
- **Tipo P:** Cemento portland con puzolana para usos cuando no se requiere alta resistencia inicial.
- **Tipo I (PM):** Cemento portland con puzolana modificado.
- **Tipo I (SM):** Cemento portland con escoria, modificado.
- **Tipo S:** Cemento con escoria para la combinación con cemento Portland en la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada en la fabricación del mortero de albañilería.

De acuerdo a Sánchez, (2009) la Norma Boliviana NB-011 los cementos portland se clasifican en los siguientes:

- Cemento portland, **Tipo I**
- Cemento portland con puzolana, **Tipo IP**
- Cemento portland con filler calizo, **Tipo IF**
- Cemento con puzolana, **Tipo P**

#### **2.10.4. Cemento tipo IP**

Es un cemento portland de tipo I con la adición de puzolana, es un cemento de menor calidad, el empleo de la puzolana fue utilizado para bajar los costos en su producción, actualmente en Bolivia se comercializa dos tipos de cemento el tipo IP 30 y el IP 40 (Gonzales, 2012).

La diferencia entre ellas es que el tipo IP 30 tiene mayor contenido de puzolana lo cual hace que su resistencia sea menor que la del tipo IP 40 que tiene menor contenido de puzolana, es decir que la cantidad de puzolana presente en el cemento va influir en que tenga menor o mayor resistencia (Gonzales, 2012).

##### **2.10.4.1. Cemento tipo IP 30**

De acuerdo a la norma Bolivia NB 011 se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP 30, este tipo de cemento llega a presentar una resistencia mínima de 30 MPa a los 28 días en mortero normalizado (Gonzales, 2012).

Se caracteriza por presentar un bajo calor de hidratación, alta impermeabilidad en hormigones, mínima fisuración y retracción térmica (Gonzales, 2012).

Su uso recomendable es en hormigones estructurales en general de viviendas y edificios, muros, revoques y pisos (Gonzales, 2012).

##### **2.10.4.2. Cemento tipo IP 40**

De acuerdo a la norma Bolivia NB 011 se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP 40, este tipo de cemento llega a presentar una resistencia mínima de 40 MPa a los 28 días en mortero normalizado (Gonzales, 2012).

Se caracteriza por presentar un moderado calor de hidratación, altas resistencias iniciales, menor tiempo de hidratación (Gonzales, 2012).

Su uso recomendable es en hormigones estructurales de alta resistencia inicial, hormigones donde se requiere desencofrados rápidos, prefabricados de hormigón, elementos pre y post tensados (Gonzales, 2012).

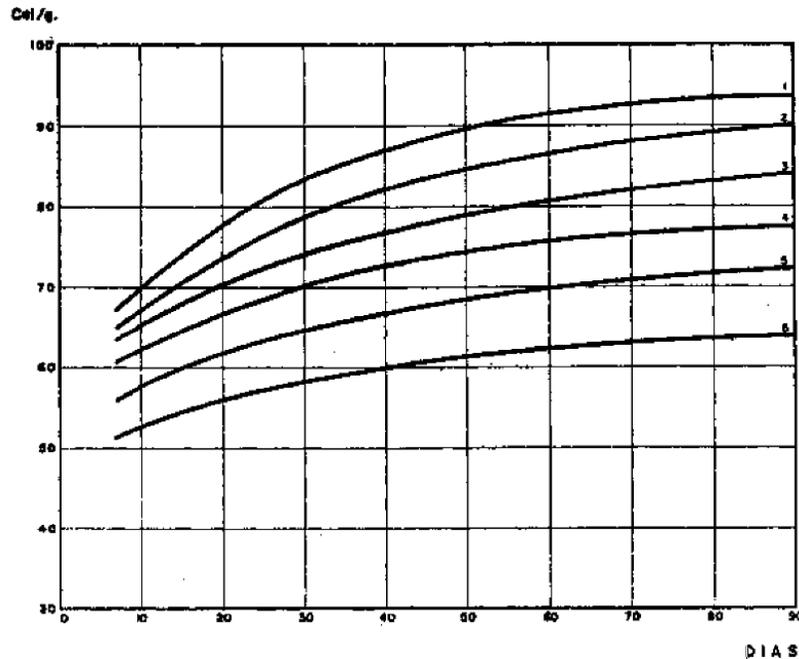
##### **2.10.4.3. Ventajas y desventajas de la puzolana en el cemento**

El reemplazo parcial del cemento con puzolana presenta sus ventajas y desventajas.

Dentro de sus ventajas incluye un aumento en la impermeabilidad, mejora la trabajabilidad, disminuye el calor de hidratación, esa última va depender de la cantidad de puzolana que le agregue al cemento pues cuanto mayor sea la cantidad de puzolana menor va ser el calor de hidratación, como se puede ver en le fig. 2.13 (Soria , 1963).

**Fig. 2.13.**

*Calor de hidratación de un cemento portland y varios puzolánicos*



Fuente: "Puzolanas y cemento puzolánicos", tomado de Soria, 1963.

Una de las principales desventajas consiste en que el cemento con puzolana desarrolla resistencias que se dan de manera más lenta que el cemento portland de tipo I (Soria , 1963).

#### **2.10.4.4. Efectos del cemento puzolánico en la retracción por secado**

La retracción por secado de los cementos con puzolana es mayor comparada con la del cemento portland normal (Soria , 1963).

En cualquier caso, que se presente, la retracción de los cementos puzolánicos es mayor en las primeras épocas de su endurecimiento, llegando a superar hasta un 30% la retracción del portland normal, este fenómeno se incrementa con el porcentaje de puzolana añadido (Soria , 1963).

## 2.11. Dosificación de mezclas de Hormigón

### 2.11.1. Métodos de dosificación utilizados en Bolivia

De acuerdo a Sánchez (2009) la dosificación de mezclas de hormigón en Bolivia se la puede dividir en dos grupos de acuerdo a la magnitud de la obra.

Para obras de poca importancia, se utiliza reglas empíricas y dosificaciones prefijadas especificando las proporciones de los componentes en volumen (Sánchez, 2009).

Para obras de mayor importancia, se utiliza métodos de procedencia extranjera, los cuales fueron creados para agregados y cementos distintos a los utilizados en Bolivia, y por estas razones tales proporciones deben ser verificadas y corregidas en mezclas de prueba en laboratorio y en campo. El método más difundido en nuestro país es el método ACI (Sánchez, 2009).

### 2.11.2. Método ACI 211.1 de la American Concrete Institute

Uno de estos procedimientos de uso muy amplio en la dosificación de hormigones es el método ACI 211.1. el cual se refiere a la práctica recomendada para dosificar hormigón normal, pesado y en masa (Sánchez, 2009).

El establecimiento de los pesos de la mezcla por metro cúbico de hormigón puede obtenerse mediante la siguiente secuencia.

**Tabla 2.12.**  
*Procedimiento de diseño*

Pasos	Descripción
1	Selección del asentamiento
2	Elección del tamaño máximo del agregado
3	Estimación del agua de mezclado y contenido de aire
4	Determinación de la resistencia media
5	Selección de la relación agua/cemento
6	Cálculo del contenido de cemento
7	Estimación del contenido de agregado grueso
8	Estimación del contenido de agregado fino
9	Corrección por absorción y contenido de humedad de los agregados

Fuente: "práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado" ACI 211.1.(como se citó en Sánchez, 2009)

**Tabla 2.13.*****Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción sistemas de colocación y compactación***

Consistencia	Asentamiento (cm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-2.00	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de hormigones de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	2.00-3.50	Pavimentos	Pavimentadoras terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	3.50-5.00	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	5.00-10.00	Elementos compactados a mano, losas, muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	10.00-15.00	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	15.00 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: "practica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado" ACI 211.1.(como se cito en Sánchez, 2009)

**Tabla 2.14.*****Requerimientos de agua de mezclado y contenido de agua para diferentes asentamientos y tamaño máximo de agregados***

Asent. (cm)	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)							
	9,51mm 3/8"	12,50mm 1/2"	19,00mm 3/4"	25,00mm 1"	38,00mm 1 1/2"	50,00mm 2"	75,00mm 3"	150,00mm 6"
	Agua de mezclado, en kg/m <sup>3</sup> de hormigón. Hormigón sin aire incorporado							
3,00 a 5,00	207	199	190	179	166	154	130	113
8,00 a 10,00	228	216	205	193	181	169	145	124
15,00 a 18,00	243	228	216	202	190	178	160	-
% aproximado de aire atrapado	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Fuente: "practica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado" ACI 211.1.(como se cito en Sánchez, 2009)

**Tabla 2.15.**

***Resistencia de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar***

Resistencia específica $f_{ck}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Menos de 210	$f_{ck}+70$
De 210 a 350	$f_{ck}+85$
Más de 350	$f_{ck}+100$

Fuente: “ACI 318”, tomados de Díaz

**Tabla 2.16.**

***Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del hormigón***

Resistencia a la compresión a los 28 días (Kg/cm <sup>2</sup> )	Hormigón sin aire incluido	Hormigón con aire incluido
140	0,82	0,74
150	0,8	0,71
200	0,7	0,61
210	0,68	0,59
250	0,62	0,53
280	0,57	0,48
300	0,55	0,46
350	0,48	0,4
400	0,43	0,34
420	0,41	0,33
450	0,38	0,31

Fuente: “practica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado” ACI 211.1.(como se cito en Sánchez, 2009)

**Tabla 2.17.*****Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón***

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla, por volumen unitario de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena						
Tamaño máximo nominal		Módulo de finura de la arena				
mm	Pulg.	2,40	2,60	2,80	3,00	
10,00	3/8"	0,50	0,48	0,46		0,44
12,50	1/2"	0,59	0,57	0,55		0,53
20,00	3/4"	0,66	0,64	0,62		0,60
25,00	1"	0,71	0,69	0,67		0,65
38,00	1 1/2"	0,75	0,73	0,71		0,69
50,00	2"	0,78	0,76	0,74		0,72
70,00	3"	0,82	0,80	0,78		0,76
150,00	6"	0,87	0,85	0,83		0,81

Fuente: "practica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado" ACI 211.1.(como se citó en Sánchez, 2009)

**2.12. Método de prueba estándar para determinar el cambio de longitud del hormigón****ASTM C157**

Este método determina los cambios de longitud que se producen por causas distintas a las fuerzas externas y cambios de temperatura en las probetas de hormigón endurecido, realizadas en laboratorio y expuestas a condiciones controladas de humedad relativa y temperatura (ASTM C 157, s.f.).

La medición del cambio de longitud permite evaluar el potencial de expansión o retracción del hormigón. Este método de ensayo es especialmente útil para la evaluación de diferentes mezclas de hormigón (ASTM C 157, s.f.).

este método proporciona información para hormigones que requieran condiciones de mezcla, colocación, manipulación, tales como alta trabajabilidad (ASTM C 157, s.f.).

**2.12.1. Normas ASTM que se emplean en el cambio de longitud****2.12.1.1. C 143 Método de prueba estándar para asentamiento del Hormigón**

El ensayo cubre la determinación del asentamiento del hormigón tanto en el laboratorio como en el campo. Consiste en colocar una muestra de hormigón recién mezclado (se compacta por varillado) dentro de un molde en forma de cono truncado. El molde se levanta, y se deja

que el hormigón se desplome. Se mide la distancia vertical al centro desplazado y se registra el valor del asentamiento del hormigón (ASTM C 143, s.f.).

#### **2.12.1.2. C 172 Práctica estándar para el muestreo del hormigón recién mezclado**

Este ensayo cubre los procedimientos para obtener muestras representativas de hormigón fresco de tal manera que cumpla con los requisitos de calidad de las especificaciones bajo las cuales se suministra el hormigón. La práctica incluye la toma de muestras de hormigoneras fijas, de pavimentación y de camiones (ASTM C 172, s.f.).

Los procedimientos utilizados para seleccionar los lotes de prueba específicos no se describen en esta práctica, pero se recomienda utilizar un muestreo aleatorio (ASTM C 172, s.f.).

Los requisitos detallados en cuanto a materiales para las mezclas, el contenido de aire, la temperatura, el número de probetas, el asentamiento, la interpretación de los resultados se encuentran en métodos de ensayo específicos (ASTM C 172, s.f.).

Obtenga y utilice rápidamente la muestra y proteger la muestra del sol, el viento y otras fuentes de evaporación rápida, y de la contaminación (ASTM C 172, s.f.).

#### **2.12.1.3. C 192 Práctica para la fabricación y curado del hormigón en laboratorio**

Cubre los procedimientos tanto para la elaboración y curado de probetas de hormigón en condiciones de laboratorio (ASTM C 192, s.f.).

Los moldes deberán ser de hierro fundido u otro material no absorbente, los moldes deberán ser conformes a las dimensiones y tolerancias especificadas, de acuerdo a los respectivos métodos para el cual se requieran, ya que se puede distinguir dos tipos de formas de las probetas (ASTM C 192, s.f.):

- Probetas cilíndricas: que pueden ser usados para ensayos de resistencia a compresión y fluencia.
- Probetas prismáticas: que pueden ser usadas para ensayos de resistencia a la flexión, cambios de longitud, cambios de volumen

Como equipo mínimo para la elaboración del hormigón se requieren de: varilla de apisonamiento de acero con el extremo redondeado, mazo con cabeza de goma, palas, paletas, regla, guantes de goma, aparato para medir el asentamiento, bandeja de muestreo, hormigonera y balanzas (ASTM C 192, s.f.).

Una vez realizado el moldeo de las probetas se debe proteger las muestras del sol, viento u otras fuentes de evaporación, dejándolas secar durante  $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$  hora, y realizar el curado por un tiempo de  $24 \pm \frac{1}{2}$  hora (ASTM C 192, s.f.).

#### **2.12.1.4. C 490 Práctica para el uso de aparatos para el cambio de longitud del hormigón**

Ensayo que indica los requisitos para los aparatos y equipos de medición para la determinación del cambio de longitud del hormigón medida a lo largo del eje longitudinal (ASTM C 490, s.f.).

Los moldes para probetas de hormigón, cuando los agregados pasan en su totalidad el tamiz de 2 pulg., será un prisma de 4 pulg. (100 mm) de sección transversal y una longitud de calibre de  $11\frac{1}{4}$  pulg. (285 mm), sin embargo, si todo el agregado pasa el tamiz de 1 pulg. se usa un prisma de sección cuadrada de 3 pulg (75 mm). La longitud de calibre se considera como una longitud nominal o patrón de los extremos los pernos de medición de la probeta; dichos pernos se incrustan en el hormigón, en la parte central de la sección transversal de la probeta cuando el mismo se está moldeando (ASTM C 490, s.f.).

Los moldes deben ser herméticos y estar unidos firmemente cuando se ensamblen, debiendo ser estos moldes de acero u otro material que no sea atacado fácilmente por la pasta de cemento (ASTM C 490, s.f.).

El medidor de los cambios de longitud debe tener un micrómetro de dial u otro dispositivo de medición graduado para leer hasta los 0,002 mm o menos de los cambios de longitud (ASTM C 490, s.f.).

Se debe tener una barra de referencia que tiene una longitud total de 295 mm, esta barra de referencia sirve para calibrar el dispositivo de medición al menos al principio y al final de las lecturas realizadas (ASTM C 490, s.f.).

### **2.12.2. Aplicación del ensayo ASTM C 157**

Este ensayo proporciona información útil sobre los cambios de longitud, tanto en condiciones estándar como en condiciones no estándar, ya sea para estudiar las condiciones de la mezcla, curado, la trabajabilidad (ASTM C 157, s.f.).

Si las condiciones con la cual se va desarrollar el ensayo de retracción son distintas a los requeridos en este método de prueba, se debe informar y no deben ser consideradas como condiciones estándar de este método (ASTM C 157, s.f.).

#### **2.12.2.1. Condiciones estándar para la determinación del cambio de longitud**

Una vez desmoldadas y curadas las probetas de hormigón estas deben ser almacenadas en una sala de secado, la cual debe de constar de unas rejillas sobre la cual se colocan las probetas dichas rejillas deben de estar diseñadas de tal manera que haya una circulación de aire alrededor de las probetas (ASTM C 157, s.f.).

La sala de secado debe de tener una determinada tasa de evaporación controlada, el aire de la habitación debe estar mantenida a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y una humedad relativa de  $50 \pm 4\%$ . La tasa de evaporación dentro de la sala de secado debe ser de  $77 \pm 30$  ml/24h medidas desde un atmómetro, la humedad o contenido de vapor en el aire será medida mediante un psicrómetro (ASTM C 157, s.f.).

#### **2.12.2.2. Condiciones de mezclado del hormigón**

Llevar los materiales a una temperatura entre  $18$  y  $24^\circ\text{C}$ , para el cálculo de las cantidades de los agregados deben estar saturados y superficialmente secos, si no está en dicha condición al momento de su uso, se debe aplicar las correcciones apropiadas para compensar la absorción o humedad libre (ASTM C 157, s.f.).

El hormigón se debe mezclar en una mezcladora de laboratorio adecuada de acuerdo a la práctica C192, determinar el asentamiento del hormigón de acuerdo al ensayo C143 produciendo un asentamiento de  $3 \pm \frac{1}{2}$  pulg (ASTM C 157, s.f.).

#### **2.12.2.3. Procedimiento de curado de las muestras**

Curar las muestras de ensayo en los moldes en una cabina o sala húmeda, se debe retirar las muestras de los moldes a la edad de  $24 \pm \frac{1}{2}$  h. la extracción de las muestras se debe realizar

de tal manera que no se ejerza presión directa contra los pernos de las probetas tomándose la primera lectura una vez desmoldado las probetas (ASTM C 157, s.f.).

### **2.12.3. Periodo de estudio de la retracción**

Culminado el tiempo de curado de las probetas se debe limpiarlas con un paño húmedo, e inmediatamente realizar la primera medición de cada una de las probetas y colocarlas en una sala de secado, las demás mediciones de la retracción se deben tomar a la edad de 4, 7, 14 y 28 días (ASTM C 157, s.f.).

Las mediciones de las muestras son durante un periodo de 28 días de acuerdo al método de ensayo ASTM C 157, preferiblemente la toma de estas lecturas debe de realizarse en una habitación mantenida a una humedad relativa de  $50\pm 4\%$  y a una temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  (ASTM C 157, s.f.).

### **2.12.4. Cambio de longitud**

El cambio de longitud de la probeta puede ser determinada a cualquier edad después de la lectura inicial con la siguiente formula (ASTM C 157, s.f.).

$$\Delta L_x = \frac{\text{Longitud patron} - \text{Longitud medida}}{\text{Longitud patron}} * 10^6 \quad \text{Ec. 2.26}$$

### **2.12.5. Dispositivo para la medición de la variación de longitud 58-C0230/30D**

Este aparato es utilizado para determinar los cambios de longitud, originalmente se diseñó para su uso en estructuras de hormigón, pero también se puede utilizar para cualquier otro tipo de estructura, como ser el acero (CONTROLS, 2008).

Es un aparato diseñado para medir variaciones en la distancia entre dos puntos de referencia, a lo largo del tiempo, que han sido colocados a una distancia conocida sobre la superficie bajo análisis (CONTROLS, 2008).

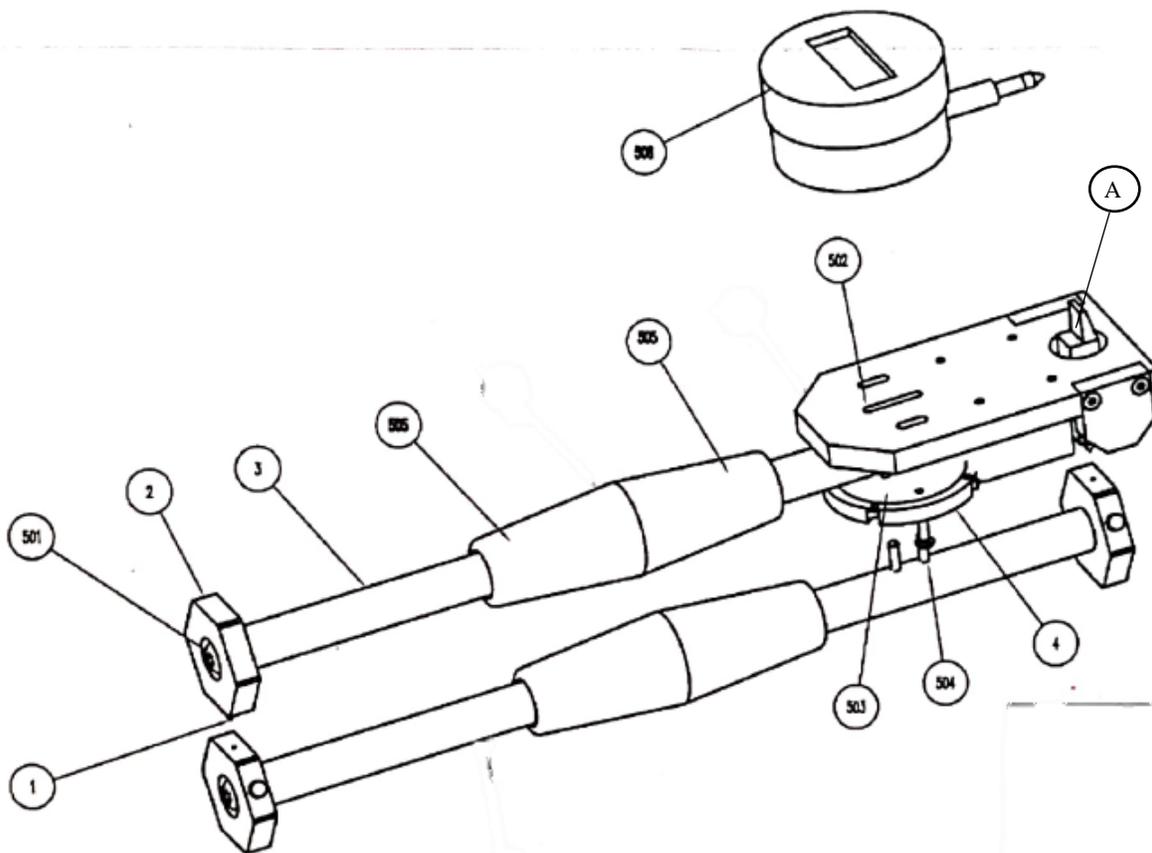
#### **2.12.5.1. Descripción del equipo de medición 58-C0230/30D**

- Consta de una barra de invar para realizar la medición, con características de baja deformabilidad térmica que tiene puntos de contacto cónicos en cada extremo. Uno de los puntos de contacto cónicos está fijo mientras que el otro oscila a lo largo del

eje de la barra y transmite las variaciones de longitud al dispositivo de lectura montado en la barra (CONTROLS, 2008).

- Una barra de invar con baja deformabilidad térmica con cabezas prismáticas de 6 lados. Uno de los lados tiene un orificio en el cual se coloca las puntas cónicas del dispositivo de medición (calibre analógico o digital). La otra cara tiene dos puntas cónicas que sirven para colocar los discos de contacto sobre la superficie a estudiar. La distancia entre los dos orificios es utilizada para poner en cero el sistema de lectura digital de la barra de medición (CONTROLS, 2008).
- El equipo viene con 50 discos que se pegan en la superficie de estudio (CONTROLS, 2008).
- Adhesivo (CONTROLS, 2008).

**Fig. 2.14.**  
*Partes del equipo*



Fuente: “Dispositivo para la medida de la variación de longitud 58-C0230/30D” tomado de Controls 2008

A continuación, se presenta la descripción de cada parte que indica la fig. 2.19. (CONTROLS, 2008).

501: Tornillo M 6x12 UNI-ISO 7380, que sirve para ajustar la varilla de invar del deformímetro (3) con la cabeza prismática en la cual se aloja el perno cónico (1).

502: Base que sirve de apoyo en la cual se ajusta el indicador digital.

503: Tornillo M 3x12 UNI-ISO 7380, utilizado para ajustar la base plana (502) con el indicador digital (506).

504: Espina cilíndrica UNI-ISO 2338- 3x10, perno utilizado para fijar la base (502) por la parte de atrás.

505: Empuñadura SI 134/105-6.

506: Indicador digital, tiene una pantalla de cristal líquido, la cual funciona con una batería de óxido de plata.

1: Pasador con extremo cónico, el cual se apoyará en los discos que se colocaron en el hormigón.

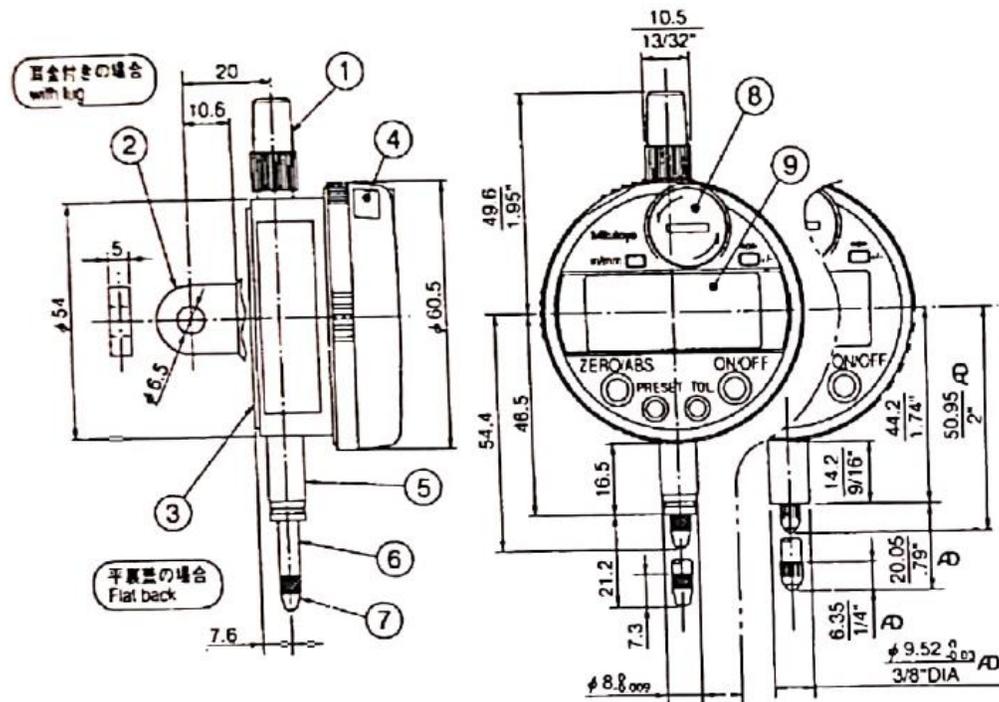
2: Encabezamiento de cabeza prismática en la cual se apoya el pasador con extremo cónico (1).

3: Varilla de invar del deformímetro.

4: Placa inferior del comparador digital.

A: Clavija móvil, esta va sujeta a la base de apoyo (502), a partir de su movimiento el indicador digital puede medir las variaciones de longitud.

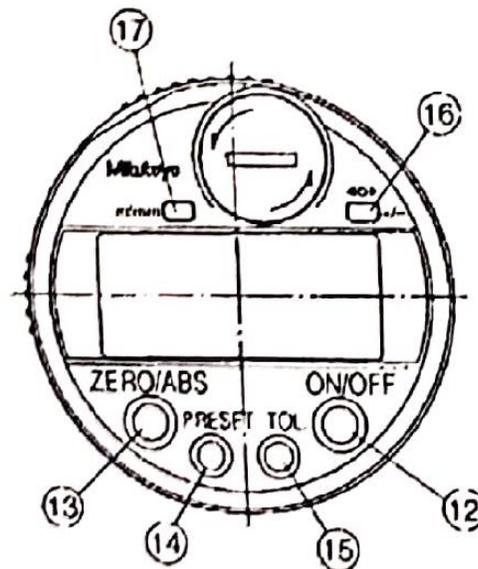
**Fig. 2.15.**  
**Partes del indicador digital**



Fuente: "Dispositivo para la medida de la variación de longitud 58-C0230/30D" tomado de Controls 2008

- 1: cabeza del vástago.
- 2: Orejeta.
- 3: Parte posterior plana.
- 4: conector de salida (con tapa de goma).
- 5: Vástago.
- 6: Eje.
- 7: Punto de contacto entre el indicador digital y la clavija móvil del deformímetro.
- 8: Tapa de la batería.
- 9: LCD

Fig. 2.16.

*Funciones de las teclas del indicador digital*

12: Para encender o apagar.

13: Sirve para colocar en cero el medidor digital.

14: Para configurar y recuperar el valor preestablecido.

15: Para establecer límites de tolerancia/modo de tolerancia.

16: Para establecer límites de tolerancia/modo de tolerancia.

17: Para cambiar la unidad entre pulgadas y mm.

### 2.12.6. Cálculos estadísticos de la precisión

Los cálculos estadísticos para la precisión son la desviación estándar de la repetibilidad y la desviación estándar de la reproducibilidad, siendo la primera la que tiene más relevancia, pues se obtiene cuando se utiliza el mismo método en idénticas muestras de ensayo, en el mismo laboratorio y por el mismo operador usando los mismos equipos mientras que la segunda es calculada bajo condiciones de diferentes operadores y utilizando diferentes equipos sobre las mismas muestras (ASTM E 691-05, 2005).

$$s_r = \sqrt{\sum_1^p \frac{s^2}{p}} \quad \text{Ec. 2.27}$$

Donde:

S= Desviación estándar de la muestra ensayada

P= Numero de muestras ensayadas

La normativa de ensayo ASTM C 157 indica que la desviación estándar de las muestras que son almacenadas al aire no deberá ser mayores a 0,0496.

### **2.12.7. Consistencia de las mediciones**

El análisis estadístico de los datos que se obtienen, tiene tres propósitos: determinar si los datos medidos son satisfactoriamente consistentes para dar un criterio de aceptación al método de ensayo; actuar en consecuencia sobre cualquier dato considerado como inconsistente; y determinar las estadísticas de la precisión en las cuales el criterio de aceptación pueda estar basada (ASTM E 691-05, 2005).

Para evaluar la consistencia de la data obtenida en un estudio la normativa ASTM E 691-05 utiliza los cálculos estadísticos de del valor de “k” que es un valor utilizado para examinar la consistencia de la precisión de cada muestra (ASTM E 691-05, 2005).

$$k = \frac{S}{S_r} \quad Ec. 2.28$$

Donde:

S= Desviación estándar de la muestra ensayada

S<sub>r</sub>= Desviación estándar de la repetibilidad de las muestras ensayadas

Para verificar la consistencia de las mediciones y poder realizar el promedio de las muestras medidas, se debe descartar la muestra que salga del límite del valor de “k” y se toma la media del resto de los datos, sin embargo, si se llega a descartar más de tres datos de esa muestra, ya no será considerada durante todo el periodo de estudio y si se llegan a descartar más de una muestra el ensayo no tendrá validez (ASTM C 596, s.f.).

Los valores críticos para evaluar la consistencia estadística son calculados a partir de las tablas de la t de student para una significancia del 0,5% de acuerdo a la práctica E 691-05.

**Tabla 2.18.****Valores críticos de  $h$  y  $k$  a un nivel de significancia de 0,5%**

Valor crítico de $h$	P	Valor crítico de $k$ , número de mediciones “ $n$ ”									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1,15	3,00	1,72	1,67	1,61	1,56	1,52	1,49	1,47	1,44	1,42	
1,49	4,00	1,95	1,82	1,73	1,66	1,60	1,56	1,53	1,50	1,47	
1,74	5,00	2,11	1,92	1,79	1,71	1,65	1,60	1,56	1,53	1,50	
1,92	6,00	2,22	1,98	1,84	1,75	1,68	1,63	1,59	1,55	1,52	
2,05	7,00	2,30	2,03	1,87	1,77	1,70	1,65	1,60	1,57	1,54	
2,15	8,00	2,36	2,06	1,90	1,79	1,72	1,66	1,62	1,58	1,55	
2,23	9,00	2,41	2,09	1,92	1,81	1,73	1,67	1,62	1,59	1,56	
2,29	10,00	2,45	2,11	1,93	1,82	1,74	1,68	1,63	1,59	1,56	
2,34	11,00	2,49	2,13	1,94	1,83	1,75	1,69	1,64	1,60	1,57	
2,38	12,00	2,51	2,14	1,96	1,84	1,76	1,69	1,64	1,60	1,57	
2,41	13,00	2,54	2,15	1,96	1,84	1,76	1,70	1,65	1,61	1,58	
2,44	14,00	2,56	2,16	1,97	1,85	1,77	1,70	1,65	1,61	1,58	
2,47	15,00	2,57	2,17	1,98	1,86	1,77	1,71	1,66	1,62	1,58	
2,49	16,00	2,59	2,18	1,98	1,86	1,77	1,71	1,66	1,62	1,58	
2,51	17,00	2,60	2,19	1,99	1,86	1,78	1,71	1,66	1,62	1,59	
2,53	18,00	2,61	2,20	1,99	1,87	1,78	1,72	1,66	1,62	1,59	
2,54	19,00	2,62	2,20	2,00	1,87	1,78	1,72	1,67	1,62	1,59	
2,56	20,00	2,63	2,21	2,00	1,87	1,79	1,72	1,67	1,63	1,59	
2,57	21,00	2,64	2,21	2,00	1,88	1,79	1,72	1,67	1,63	1,59	
2,58	22,00	2,65	2,21	2,01	1,88	1,79	1,72	1,67	1,63	1,59	
2,59	23,00	2,66	2,22	2,01	1,88	1,79	1,72	1,67	1,63	1,59	
2,60	24,00	2,66	2,22	2,01	1,88	1,79	1,73	1,67	1,63	1,60	
2,61	25,00	2,67	2,23	2,01	1,88	1,79	1,73	1,67	1,63	1,60	
2,62	26,00	2,67	2,23	2,02	1,89	1,80	1,73	1,68	1,63	1,60	
2,62	27,00	2,68	2,23	2,02	1,89	1,80	1,73	1,68	1,63	1,60	
2,63	28,00	2,68	2,23	2,02	1,89	1,80	1,73	1,68	1,63	1,60	
2,64	29,00	2,69	2,24	2,02	1,89	1,80	1,73	1,68	1,64	1,60	
2,64	30,00	2,69	2,24	2,02	1,89	1,80	1,73	1,68	1,64	1,60	

Fuente: “Práctica estándar para determinar la precisión de un método de ensayo” tomado de ASTM E691-05

Nota: “ $n$ ” es el número de mediciones que se le realiza a las muestras y P es el número de muestras ensayadas

El valor de “ $k$ ” se obtiene entrando a la tabla 2.21. con la columna p, que es el número de muestras ensayadas y con el número de mediciones “ $n$ ” que se lo realiza a cada una de las muestras (ASTM E 691-05, 2005).

**CAPÍTULO III**  
**MARCO**  
**METODOLÓGICO**

### 3.1. Criterios del diseño metodológico

#### 3.1.1. Población

Se quiere valorar las características de los materiales mediante ensayos de laboratorio para la presente investigación que trata sobre a determinación de la retracción por secado del hormigón. Las fases de la investigación se encuentran en la tabla 3.1.

Todos los trabajos terminan en ensayos de laboratorio, por lo tanto, se estiman cantidades de ensayos de acuerdo a sus características propias.

**Tabla 3.1.**  
*Ensayos a realizarse en la investigación*

Fase de la investigación	Ensayos	Ni
Caracterización de los materiales	Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM C136)	5
	Peso unitario de agregado grueso y fino (ASTM C 29)	5
	Método para determinar el peso específico y la absorción de agua en agregados gruesos (ASTM C 127)	5
	Método para determinar el peso específico y la absorción de agua en agregados finos (ASTM C 128)	5
	Peso específico del cemento (ASTM C 188)	5
	Finura del cemento (ASTM C 184)	5
Pruebas de resistencia del hormigón	Resistencia a la compresión 21 MPa	20
	Resistencia a la compresión 25 MPa	20
Pruebas de medición de la retracción	Vigas para mediciones de la retracción para 21 MPa	15
	Vigas para mediciones de la retracción para 25 MPa	15
Total ensayos		100

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2. Tamaño de la muestra

#### 3.1.2.1. Muestreo estratificado

El muestreo estratificado es una técnica o procedimiento en la que se divide la población bajo estudio en distintos subgrupos o estratos. Una característica esencial de la estratificación es que cada elemento debe pertenecer a un único estrato (Manterola, 2017).

La técnica de muestreo es probabilística (aleatorio).

#### 3.1.2.2. Desarrollo

Unidad elemental de la muestra: El ensayo de la muestra.

Población: N=100 ensayos establecidos para a investigación.

Tamaño de la muestra “n”: desconocido

Variable a medir: Características de los materiales, medición de la resistencia a compresión y la retracción por secado.

##### 3.1.2.2.1. Cálculos y análisis previos

- Para la aplicación previa de la técnica de muestreo determinamos la varianza “ $\sigma$ ” que va en función del tiempo se optó por 0,10; e; análisis de la varianza depende del tiempo que se emplea en realizar el estudio como se muestra en la tabla 3.2 (Yurquina Flores, s.f.).

**Tabla 3.2.**

*Variables de la varianza en función al tiempo*

Varianza “ $\sigma$ ”	Descripción
0,25	Investigaciones que requieren mayor cantidad de tiempo y muestra
0,15	Investigaciones que requieren en promedio 6 meses de tiempo
0,10	Investigaciones que requieren entre 4-6 meses de tiempo.

Fuente: “libro de proyecto grado CIV-501” tomado de Msc. Ing. Luis Yurquina

- Una investigación es exigente y por lo menos se tiene que establecer como nivel de confianza del 95 %.
- El valor de significancia que se toma está de acuerdo al nivel de confianza ver tabla 3.3. (Yurquina Flores, s.f.).

**Tabla 3.3.**  
*Nivel de confianza*

Z	Confianza %
1,15	75
1,28	80
1,44	85
1,64	90
1,96	95
2,05	96
2,17	97
2,33	98
2,58	99

Fuente: “libro de proyecto grado CIV-501” tomado de Msc. Ing. Luis Yurquina

- El margen de error es:  $e=5\%$ , deducido por el nivel de confianza que propone el investigador

### 3.1.2.3.Cálculo de muestra estratificada

$$n = \frac{\sum_{i=1}^l Ni * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^l Ni * \sigma^2}{N}}$$

Donde:

$N_i$  = Tamaño de la población finita

$n$  = Número total de muestras

$\sigma^2$  = Varianza

e = Error de tolerancia (generalmente 5 %)

z = Nivel de significancia 1.96 (95%)

fi = Tamaño de la muestra/número total de muestras

**Tabla 3.4.**  
*Numero de ensayos a realizar en laboratorio*

Ensayos	Ni	$\sigma^2$	$N_i \sigma^2$	fi	ni
Método para tamizar y determinar la granulometría (ASTM C136)	5	0,1	0,5	0,053	3
Peso unitario de agregado grueso y fino (ASTM C 29)	5	0,1	0,5	0,053	3
Método para determinar peso específico y la absorción de agua en áridos gruesos (ASTM C 127)	5	0,1	0,5	0,053	3
Método para determinar peso específico y la absorción de agua en áridos finos (ASTM C 128)	5	0,1	0,5	0,053	3
Peso específico del cemento (ASTM C 188)	5	0,1	0,5	0,053	3
Finura del cemento (ASTM C 184)	5	0,1	0,5	0,053	3
Resistencia a la compresión 21 MPa	20	0,1	2	0,211	15
Resistencia a la compresión 25 MPa	20	0,1	2	0,211	15
Retracción 21 MPa	15	0,1	1,5	0,158	12
Retracción 25 MPa	15	0,1	1,5	0,158	12
Total	100		10		72

Fuente: Elaboración propia.

Nota: los valores de la afijación de la última columna, se redondearon al inmediato superior

$$n = \frac{10}{100 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{10}{100}}$$

$$n = 61 \text{ ensayos}$$

### 3.1.3. Procedencia de los agregados

#### 3.1.3.1. Agregado grueso

Se realizó los ensayos del agregado grueso, obtenidos de la chancadora GARZÓN, esta se ubica al norte de la ciudad en el barrio San Mateo con las coordenadas siguientes. Latitud: 21°28' 18,06" S, Longitud: 64° 45' 1,67" O.

**Fig. 3.1.**  
***Planta de trituración “Garzon”***

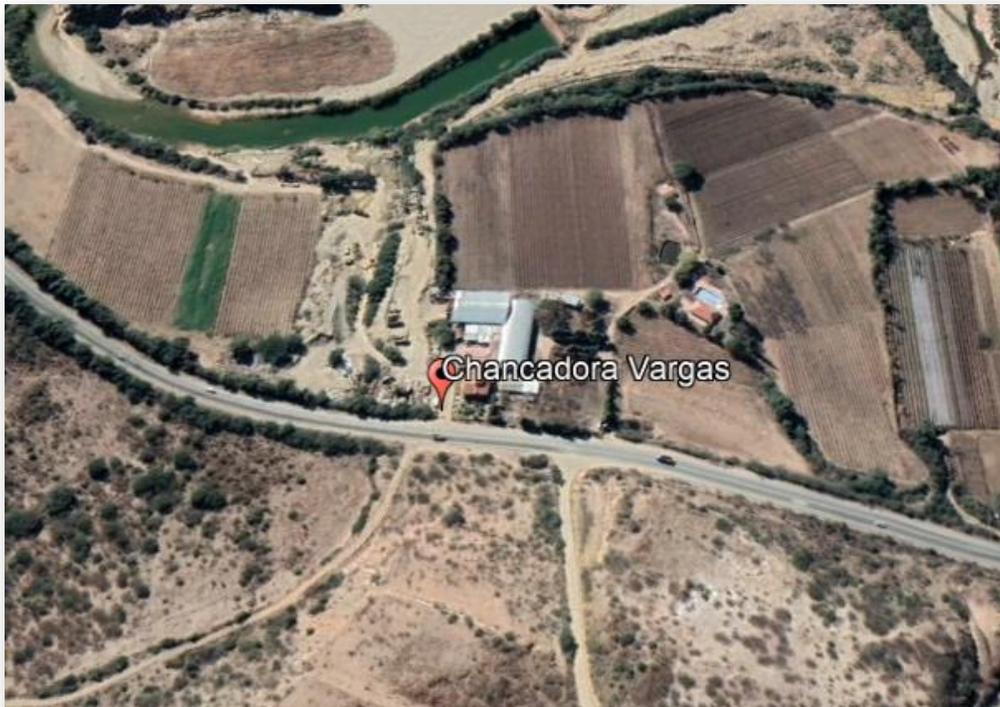


Fuente: Elaboración propia

### **3.1.3.2. Localización del agregado fino**

se realizó los ensayos del agregado fino, obtenidos de la chancadora Vargas, esta se ubica al Sur de la ciudad en la localidad de Santa Ana con las coordenadas siguientes. Latitud:  $21^{\circ}37'3.32''$  S, Longitud:  $64^{\circ}38'38.56''$ O, que se encuentra a una distancia de 8.50 km aproximadamente del centro de la ciudad de Tarija

**Fig. 3.2.**  
***Plata de trituración “Vargas”***



Fuente: Elaboración propia

## **3.2. Caracterización de los materiales**

### **3.2.1. Criterios de extracción**

El método para realizar la extracción y preparación de las muestras se lo realizo con la norma ASTM C 75, método que establece los procedimientos para extraer y preparar las muestras representativas de áridos grueso y finos, se aplica tanto a áridos naturales y manufacturados (triturados) (ASTM C 75, s.f.).

La cantidad de muestra tomada en terreno debe ser tal que represente la naturaleza y condicion de los aridos. Para ello se debe redujo por cuarteo de acuerdo a la norma ASTM C 702 hasta obtener una cantidad de al menos el doble de la requerida en la muestra de laboratorio, la cual depende del tipo y numero de ensayos a los cuales sera estudiado (ASTM C 75, s.f.).

Se debe mezclar bien el material hasta formar una pila en forma de cono; revuelva de nuevo hasta formar un nuevo cono se debe repetir esta operación tres veces; posterior a ello se debe distribuir con una pala tan uniformemente como sea posible sobre una lona u otra superficie lisa, plana y ancha; se debe dividir el montón en cuatro partes iguales, con una pala de borde recto o una plancha de metal ver (ASTM C 75, s.f.).

### **3.3. Ensayos de caracterización de los materiales que conforman el hormigón**

#### **3.3.1. Granulometría**

La granulometría se define como la distribución del tamaño de sus partículas que componen una muestra (Díaz, 2005).

##### **3.3.1.1. Granulometría del agregado grueso**

###### **3.3.1.1.1. Objetivo**

Este ensayo tiene como principal objetivo el poder determinar el diámetro máximo de partículas y la distribución de tamaño en el agregado, método que abarca un procedimiento de diferenciación de los tamaños, utilizando tamices de aberturas cuadradas el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A1.

##### **3.3.1.2. Granulometría del agregado fino**

###### **3.3.1.2.1. Objetivo**

Este ensayo tiene como objetivo principal el poder determinar la distribución de tamaños de las partículas en el agregado fino, método que abarca un procedimiento de diferenciación de los tamaños, utilizando tamices de aberturas cuadradas siendo también aplicable al empleo de cribas de laboratorio de aberturas circulares. A partir del análisis granulométrico también se determinará el módulo de finura del agregado fino (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

Módulo de Finura. - Se calcula dividiendo la sumatoria de los porcentajes de pesos retenidos en cada tamiz entre 100 como se muestra en la Ec. 3.1. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A2 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019):

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Ret. (N}^\circ 4, N^\circ 8, N^\circ 16, N^\circ 30, N^\circ 50, N^\circ 100)}{100} \text{ Ec. 3.1.}$$

### 3.3.2. Peso específico y absorción de los agregados

#### 3.3.2.1. Agregado grueso

##### 3.3.2.1.1. Objetivo

El ensayo que a continuación se describe tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el grueso cuando se sumerge en agua por un período de 24 Horas. Una vez obtenido todos los datos necesarios se hace el cálculo para encontrar el peso específico de la grava, para ello se hace uso de las Ec. 3.2., 3.3., 3.4. y el porcentaje de absorción se calcula con la Ec. 3.5. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A3 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C} \text{ Ec. 3.2.}$$

Donde:

A= Peso de la muestra secada en Kg.

B= Peso de la muestra saturada con superficie seca en Kg.

C= Peso de la muestra saturada dentro del agua en Kg.

$$\text{Peso específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C} \text{ Ec. 3.3.}$$

Donde:

(B-C) = Este término es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado, o sea, el volumen de la muestra

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C} \text{ Ec. 3.4.}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 \text{ Ec. 3.5.}$$

### 3.3.2.2. Agregado fino

#### 3.3.2.2.1. Objetivo

El ensayo que a continuación se describe tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que el porcentaje de absorción del agregado fino después de 24 horas de inmersión en agua a temperatura ambiente (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

El peso específico a granel en la condición de saturado y superficie seca es el valor que generalmente se aplica en la dosificación de hormigones, se seleccionará aproximadamente 2 Kg de agregado fino para realizar el ensayo. Una vez obtenido todos los datos necesarios se hace el cálculo para encontrar el peso específico de la arena, para ello se hace uso de las Ec. 3.6., 3.7., 3.8. y el porcentaje de absorción se calcula con la Ec. 3.9. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A4 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V - W} \text{ Ec. 3.6.}$$

Donde:

A= Peso de la muestra en el aire de la muestra secada al horno en Kg.

V= Volumen del frasco en ml.

W= Peso en Kg del agua agregado al frasco en Kg.

$$\text{Peso específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{500}{V - W} \text{ Ec. 3.7.}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)} \text{ Ec. 3.8.}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100 \text{ Ec. 3.9.}$$

### **3.3.3. Peso unitario de los agregados**

#### **3.3.3.1. Agregado grueso**

##### **3.3.3.1.1. Objetivo**

Este ensayo tiene como objetivo describir cómo se puede obtener el peso unitario suelto y compactado del agregado grueso a la temperatura ambiente (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando el peso del molde del peso de la muestra compactada más molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde como se ve en la Ec. 3.10. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A5 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

$$Pu = \frac{Pn}{V} \text{ Ec. 3.10.}$$

Donde:

Pu= Peso unitario

Pn= Peso neto del agregado

V= Volumen calibrado del molde

#### **3.3.3.2. Agregado fino**

##### **3.3.3.2.1. Objetivo**

Este ensayo tiene como objetivo describir cómo se puede obtener el peso unitario suelto y compactado del agregado fino a la temperatura ambiente. El peso neto del agregado dentro del molde se obtiene restando el peso del molde del peso de la muestra compactada más molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde de acuerdo a la Ec. 3.10. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A6 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

### 3.3.4. Cemento

#### 3.3.4.1. Peso específico del cemento

##### 3.3.4.1.1. Objetivo

Este ensayo tiene por objetivo presentar un método para determinar el peso específico del cemento, el valor que aquí se determina se usa específicamente para el diseño y control de la producción de la mezcla de hormigón, para la prueba se toman 64 gr, el peso específico del cemento se calcula con la Ec. 3.11. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A7 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

$$P.E. = \frac{\text{Peso del cemento en gramos}}{\text{Volumen desplazado}} \quad \text{Ec. 3.11.}$$

#### 3.3.4.2. Finura del cemento

##### 3.3.4.2.1. Objetivo

El objeto de esta práctica es la determinación de la finura del cemento, por medio de métodos mecánicos, en este caso con el uso del tamiz de malla N° 200, para la prueba se toman 50 gr. Este parámetro se calcula utilizando la Ec. 3.12. el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo A8 (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

$$F = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \quad \text{Ec. 3.12.}$$

F= Finura del cemento expresada como porcentaje del cemento que pasa el tamiz N° 200

$P_i$ = Peso de la muestra de ensayo 50 gr.

$P_f$ = Peso del residuo que no pasa no el tamiz N° 40 ni N° 200. En gr.

### 3.4. Preparación del hormigón

Abarca el procedimiento de preparación del hormigón, el mismo que se realizó en el laboratorio, bajo un control riguroso de las cantidades de materiales y condiciones de ensayo (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

### 3.4.1. Preparación de los materiales

- El cemento se almacena en un lugar seco del laboratorio, a prueba de humedad.
- Los agregados para cada preparación de hormigón deben estar de acuerdo con la granulometría deseada. Deben ser tratados (Lavado y secado) y además corregidos antes de su empleo, a fin de asegurar una condición de humedad definida y uniforme.

### 3.4.2. Pesada de materiales

Todos los materiales que conformaran la mezcla de hormigón deben ser pesadas en balanzas precisas y sensibles al gramo (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

**Fig. 3.3.**

#### *Pesado de materiales*



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3. Mezclado del hormigón

El hormigón será mezclado en una hormigonera mediana, la misma que era adecuada para la cantidad de hormigón que se debe preparar (Laboratorio de Hormigón Dpto. de Estructuras y Ciencias de los Materiales, 2019).

El orden y manera de introducir los materiales a la hormigonera activada para obtener una mezcla homogénea y satisfactoria:

- Se introduce la mitad del agua necesaria, para posterior a ello incorporar la mitad de la grava de manera que esta se humedezca.

- Posterior a lo anterior se incorporan la mitad de arena y luego la de cemento, para que estas sean mezcladas hasta un estado homogéneo.
- Luego se debe añadir las cantidades restantes de los materiales en la misma secuencia que se indica en los pasos anteriores.

El método anteriormente indicado es un buen parámetro para lograr una mezcla satisfactoria, a menos que un procedimiento diferente se adapte mejor a la hormigonera que se está utilizando.

**Fig. 3.4.**

***Elaboración del hormigón***



Fuente: Elaboración propia

### **3.4.4. Vaciado y moldeo de probetas de hormigón**

El vaciado y moldeo de las probetas de hormigón, se basó de acuerdo a la norma ASTM C-192, en el Laboratorio de Resistencia de los Materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

#### **3.4.4.1.1. Probetas para el ensayo a compresión**

Para las probetas que se ensayaron a compresión se realizarán 15 probetas cilíndricas para comprobar que la dosificación alcance a la resistencia prevista de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y otras 15 para la resistencia de 250 Kg/cm<sup>2</sup> siendo ensayadas a los 28 días.

Las probetas para el ensayo de compresión son de forma cilíndrica con una longitud igual a dos veces el diámetro. Las probetas cilíndricas Standard son de 15cm de diámetro y 30cm de alto para hormigón con agregado grueso de tamaño nominal inferior a 2". El proceso de vaciado del hormigón se realiza de la siguiente manera:

- Se colocan en tres capas de aproximadamente igual en volumen.
- Cada capa se debe golpear 25 veces con una barra metálica de 5/8" de diámetro y 60cm de largo con punta redondeada.
- Los golpes son distribuidos uniformemente sobre la sección y de manera que penetren apenas en la capa de abajo.
- Una vez llenado los moldes con las tres capas de hormigón se procede a enrazarlo y proceder a su planchado de la última capa.

**Fig. 3.5.**

*Llenado de probetas cilíndricas con hormigón fresco*



Fuente: Elaboración propia

**3.4.4.1.2. Probetas para el ensayo de retracción**

Para las probetas que se midieron para la retracción se realizó 12 vigas para la resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y otras 12 para la resistencia de 250 Kg/cm<sup>2</sup>.

Las probetas para el ensayo de retracción son de forma prismática rectangular de sección transversal de 10 cm por 10 cm y de un largo de 30 cm, mismas que son elaboradas en madera conformada con pernos que los ajustarán, en su interior serán colocadas planchas de aluminio

para tratar de evitar que el agua de la mezcla se escurra, recubriéndolas a su vez con una capa delgada de aceite mineral antes de su uso, para evitar que el hormigón se pegue al molde durante su endurecimiento (ASTM C 157, s.f.).

- La viga de ensayo está formada con su eje longitudinal en posición horizontal.
- El hormigón será colocado en dos capas de acuerdo a la altura de la sección transversal de acuerdo a la práctica C 192 y cada capa se golpea y penetra con una barra metálica 50 veces.
- Para la capa superior el molde deberá llenarse en exceso, hasta excederlo y garantizar la cantidad necesaria para la viga.
- Después de que cada capa es golpeada y penetrada con la barra, el hormigón es enrasado a lo largo de los cuatro lados.
- Los costados de los moldes se golpearán ligeramente e insistentemente para cerrar los vacíos.
- Después de completar las operaciones de consolidación indicadas antes, la capa superior o final se debe nivelar con una plancha y alisarlo.

**Fig. 3.6.**

***Llenado de vigas con hormigón fresco***



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.5. Curado de las Muestras ASTM C 192

El curado de las muestras se realizó en el interior del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UAJMS. Los especímenes deben desencofrarse  $23 \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$  horas después de ser moldeados; posterior a ello se realiza el curado en agua durante  $24 \pm \frac{1}{2}$  horas para el caso de las vigas y las probetas que se ensayarán para compresión se dejan sumergidos hasta el momento de su ensayo de rotura (ASTM C 157, s.f.).

**Fig. 3.7.**

*Muestras elaboradas previo al desencofrado de las mismas para luego ser sumegidas en agua*



Fuente: Elaboración propia

**Fig. 3.8.**

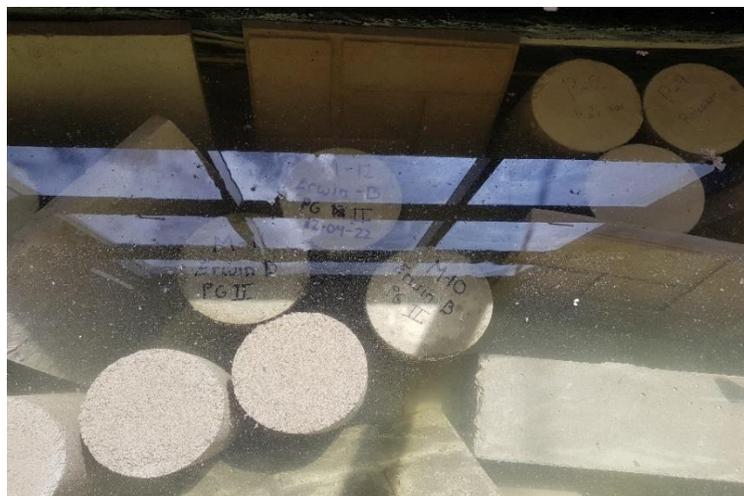
*Muestras de vigas elaboradas previo al desencofrado de las mismas para luego ser sumegidas*



Fuente: Elaboración propia

**Fig. 3.9.**

*Curado de las probetas cilíndricas*



Fuente: Elaboración propia

**Fig. 3.10.*****Curado de las vigas***

Fuente: Elaboración propia

### **3.5. Control del hormigón en su estado endurecido**

#### **3.5.1. Compresión de probetas cilíndricas**

Este método de ensayo abarca el procedimiento para determinar la resistencia a compresión del hormigón.

##### **3.5.1.1. Procedimiento**

La máquina de ensayo utilizada es una prensa hidráulica de compresión, perteneciente al laboratorio hormigones de la UAJMS, la misma que proporciona una velocidad de carga adecuada y está equipada con dos placas de apoyo de acero, mismas que se colocan en la cara superior e inferior de la probeta, a continuación, se describe la secuencia de pasos para realizar la ruptura de las muestras.

- Transcurrido el tiempo de 28 días se procede a sacar las muestras de la piscina, se la debe hacer secar durante 24 horas para proceder con el ensayo de compresión.
- Una vez transcurrido las 24 horas del paso anterior se procede a pesar las muestras y a medir las dimensiones de la misma.
- Se procede a introducir los datos en la prensa hidráulica, e iniciar con la ruptura de la muestra.
- Se debe colocar las placas de acero en la parte superior e inferior de la muestra.

- Se registra los datos de la fuerza y presión, que son obtenidos de la prensa hidráulica

**Fig. 3.11.**

***Cilindro ensayado a compresión***



Fuente: Elaboración propia

### **3.5.2. Medición de las vigas debido a la retracción**

Este método de ensayo abarca el procedimiento para medir las deformaciones debido a la retracción por secado del hormigón.

#### **3.5.2.1. Procedimiento**

Para la medición de las vigas se utilizaron pequeños discos los cuales se pegaron en los extremos de las vigas con ayuda de el pegamento poxipol y silicona caliente colocados a una distancia exacta con el comparador patrón, a continuación, se describe la secuencia de pasos para realizar las mediciones.

- Transcurrido el tiempo de 24 horas de curado se procede a sacar las muestras de la piscina y se debe dejar escurriendo.
- Una vez secado se debe colocar los discos sobre una de las caras de la viga con ayuda de pegamento poxipol que servirá de base y fijarlo con silicona caliente, los discos deben ser colocados sobre el eje longitudinal de la viga y con ayuda del comparador patrón.

- Al día siguiente se procede a realizar las mediciones de la retracción, calibrando previamente el deformímetro con ayuda del comparador patrón.
- Para cada muestra se realizó 10 mediciones, teniendo cuidado que no se descalibre el deformímetro
- Culminado las mediciones de las vigas se realiza el pesaje de las mismas.
- Finalizado los pasos anteriores se debe registrar los datos de la humedad relativa y temperatura en ese instante.

**Fig. 3.12.**

*Discos que se colocaron en las vigas para su medición*



Fuente: Elaboración propia

**Fig. 3.13.**

*Colocado de los discos en las vigas*



Fuente: Elaboración propia

**Fig. 3.14.**

*Medición de las deformaciones debido a la retracción*



Fuente: Elaboración propia

**Fig. 3.15.**

*Medición del peso de las vigas*



Fuente: Elaboración propia

**CAPÍTULO IV**  
**MARCO PRACTICO**

#### 4.1. Presentación de resultados de los ensayos

En la tabla 4.1. se muestran los resultados de los ensayos de caracterización, las planillas de cálculo se muestran en el anexo A 9.

**Tabla 4.1.**  
*Datos de los ensayos de laboratorio realizados*

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	2,63
2.- Peso unitario Compactado de la grava ( PUC )	g/cm <sup>3</sup>	1,54
3.- Peso específico de la arena ( $\gamma_f$ )	g/cm <sup>3</sup>	2,55
4.- Peso específico de la grava ( $\gamma_g$ )	g/cm <sup>3</sup>	2,70
5.- Absorción de la arena ( Aar )	%	1,39
6.- Absorción de la Grava ( Agr )	%	1,51
7.- Humedad de la Arena ( Har )	%	4,68
8.- Humedad de la Grava ( Hgr )	%	1,12
9.- Tamaño máximo Nominal ( TMN )	pulg	3/4"
10.- Tamaño Máximo ( TM )	pulg	1"
11.- Peso específico del cemento	g/cm <sup>3</sup>	3,12

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2. Dosificación

A continuación, se presentan los resultados de la dosificación para las resistencias características de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y 250 Kg/cm<sup>2</sup>.

- Para  $F_{ck} = 210 \text{ Kg/cm}^2$

**Tabla 4.2.*****Pesos secos de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón para F<sub>ck</sub> = 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

Materiales	Peso Seco kg/m <sup>3</sup>	Volumen Absoluto kg/m <sup>3</sup>	Peso específico kN/m <sup>3</sup>
<i>Cemento</i>	368,04	0,12	31,22
<i>Agua</i>	205	205	10,00
<i>Grava</i>	978,68	0,36	27,01
<i>Arena</i>	751,33	0,29	25,48
<b>TOTAL</b>	<b>2303,06</b>	<b>205,78</b>	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.3.*****Pesos húmedos de los materiales por m<sup>3</sup> de Hormigón F<sub>ck</sub> = 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

Material	Peso Seco kg/m <sup>3</sup>	Peso Húmedo kg/m <sup>3</sup>
<i>Cemento</i>	368,04	368,04
<i>Agua</i>	205	184,01
<i>Grava</i>	978,68	989,64
<i>Arena</i>	751,33	786,52
<b>TOTAL</b>	<b>2303,06</b>	<b>2328,21</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.4.*****Proporciones de mezcla seca F<sub>ck</sub> = 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
1,0	2,04	2,66

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.5.*****Proporciones de mezcla húmeda F<sub>ck</sub> = 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
1,0	2,14	2,69

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.6.*****Cantidad de material húmedo para 4 cilindros F<sub>ck</sub> = 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

Diámetro (m)	Altura (m)	Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Agua (Kg)
0,15	0,30	8,59	18,35	23,08	4,29

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.7.*****Cantidad de material húmedo para 4 vigas  $F_{ck} = 210 \text{ Kg/cm}^2$*** 

Ancho (m)	Alto (m)	Largo (m)	Cemento (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Agua (Kg)
0,10	0,10	0,30	4,86	10,38	13,06	2,43

Fuente: Elaboración propia.

- Para  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$

**Tabla 4.8.*****Pesos secos de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón para  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$*** 

Materiales	Peso Seco kg/m <sup>3</sup>	Volumen Absoluto kg/m <sup>3</sup>	Peso especifico kN/m <sup>3</sup>
<i>Cemento</i>	409,18	0,13	31,22
<i>Agua</i>	205	205	10,00
<i>Grava</i>	978,68	0,36	27,01
<i>Arena</i>	717,75	0,28	25,48
<b>TOTAL</b>	<b>2310,61</b>	<b>205,78</b>	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.9.*****Pesos húmedos de los materiales por m<sup>3</sup> de Hormigón  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$*** 

Material	Peso Seco kg/m <sup>3</sup>	Peso Húmedo kg/m <sup>3</sup>
<i>Cemento</i>	409,18	409,18
<i>Agua</i>	205	185,12
<i>Grava</i>	978,68	989,64
<i>Arena</i>	717,75	751,36
<b>TOTAL</b>	<b>2310,61</b>	<b>2335,30</b>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.10.*****Proporciones de mezcla seca  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$*** 

<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
1,0	1,75	2,39

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.11.*****Proporciones de mezcla húmeda  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$*** 

<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
1,0	1,84	2,42

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.12.*****Cantidad de material húmedo para 4 cilindros  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$*** 

<i>Diámetro (m)</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Cemento (Kg)</i>	<i>Arena (Kg)</i>	<i>Grava (Kg)</i>	<i>Agua (Kg)</i>
0,15	0,30	9,54	17,53	23,08	4,32

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.13.*****Cantidad de material húmedo para 4 vigas  $F_{ck} = 250 \text{ Kg/cm}^2$*** 

<i>Ancho (m)</i>	<i>Alto (m)</i>	<i>Largo (m)</i>	<i>Cemento (Kg)</i>	<i>Arena (Kg)</i>	<i>Grava (Kg)</i>	<i>Agua (Kg)</i>
0,10	0,10	0,30	5,40	9,92	13,06	2,44

Fuente: Elaboración propia.

### **4.3. Análisis del comportamiento del hormigón**

#### **4.3.1. Análisis de las probetas cilíndricas ensayadas a compresión**

La tabla 4.14. y 4.15. se detalla: la probeta, edad de rotura, peso específico y la resistencia a compresión individual de cada muestra, además de una resistencia promedio de todas las muestras.

**Tabla 4.14.***Detalle de rotura de las probetas cilíndricas ensayadas a compresión para 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

N°	Edad en Días	Resistencia		Peso Unitario
		MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
1	28	24,43	244,30	2437,07
2	28	24,65	246,50	2455,94
3	28	20,06	200,60	2448,39
4	28	20,99	209,90	2449,34
5	28	28,52	285,20	2442,73
6	28	27,70	277,00	2466,31
7	28	26,11	261,10	2439,90
8	28	22,67	226,70	2434,25
9	28	28,46	284,60	2443,68
10	28	25,09	250,90	2445,56
11	28	23,52	235,20	2443,68
12	28	25,36	253,60	2448,39
13	28	26,36	263,60	2440,85
14	28	24,31	243,10	2447,45
15	28	24,10	241,00	2444,62
	Promedio	24,82	248,22	2445,88

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.15.*****Detalle de rotura de las probetas cilíndricas ensayadas a compresión para 250 Kg/cm<sup>2</sup>***

N°	Edad en Días	Resistencia		Peso Unitario
		MPa	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
1	28	28,79	287,90	2480,46
2	28	26,62	266,20	2515,36
3	28	27,81	278,10	2471,97
4	28	29,46	294,60	2470,08
5	28	31,28	312,80	2480,46
6	28	28,60	286,00	2469,14
7	28	25,92	259,20	2489,89
8	28	32,88	328,80	2504,04
9	28	27,73	277,30	2502,15
10	28	31,94	319,40	2476,69
11	28	24,98	249,80	2455,94
12	28	30,87	308,70	2486,12
13	28	27,05	270,50	2471,03
14	28	29,77	297,70	2460,65
15	28	32,65	326,50	2468,20
	Promedio	29,09	290,90	2480,14

Fuente: Elaboración propia

**4.3.2. Análisis de las probetas prismáticas ensayadas a retracción**

En las tablas 4.16. y 4.17. correspondiente a la resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y las tablas 4.18. y 4.19. correspondientes a la resistencia de 250 Kg/cm<sup>2</sup> se detallan: la cantidad de probetas, deformación en los días de medición durante los 28 días.

**Tabla 4.16.**  
*Deformación de las muestras de 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Día	Deformación (mm)												
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12	
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	-0,044	0,030	-0,027	0,008	-0,008	-0,013	-0,020	-0,019	-0,002	-0,041	-0,036	-0,017	-0,017
3	-0,065	0,008	-0,060	-0,007	-0,027	-0,043	-0,052	-0,031	-0,019	-0,082	-0,039	-0,040	-0,040
7	-0,148	-0,052	0,000	-0,096	-0,097	-0,149	-0,104	-0,121	-0,076	-0,148	-0,147	-0,117	-0,117
8	-0,147	-0,093	-0,077	-0,061	-0,086	-0,141	-0,111	-0,126	-0,048	-0,141	-0,128	-0,092	-0,092
9	-0,163	-0,083	-0,081	-0,086	-0,084	-0,162	-0,098	-0,128	-0,071	-0,114	-0,110	-0,095	-0,095
10	-0,163	-0,091	-0,078	-0,140	-0,104	-0,167	-0,110	-0,136	-0,075	-0,178	-0,153	-0,110	-0,110
11	-0,163	-0,086	-0,082	-0,136	-0,100	-0,187	-0,103	-0,128	-0,068	-0,142	-0,145	-0,100	-0,100
15	-0,169	-0,092	-0,104	-0,135	-0,096	-0,182	-0,126	-0,130	-0,058	-0,164	-0,140	-0,118	-0,118
16	-0,167	-0,093	-0,110	-0,144	-0,106	-0,205	-0,133	-0,132	-0,061	-0,158	-0,153	-0,100	-0,100
17	-0,177	-0,115	-0,114	-0,188	-0,120	-0,209	-0,112	-0,150	-0,077	-0,199	-0,162	-0,109	-0,109
18	-0,176	-0,100	-0,124	-0,194	-0,128	-0,209	-0,131	-0,143	-0,077	-0,191	-0,169	-0,108	-0,108
21	-0,168	-0,096	-0,124	-0,156	-0,120	-0,207	-0,129	-0,144	-0,075	-0,189	-0,161	-0,125	-0,125
22	-0,172	-0,111	-0,123	-0,158	-0,124	-0,230	-0,127	-0,146	-0,075	-0,196	-0,163	-0,135	-0,135
23	-0,176	-0,102	-0,132	-0,128	-0,113	-0,216	-0,129	-0,154	-0,077	-0,187	-0,166	-0,122	-0,122
24	-0,185	-0,102	-0,127	-0,125	-0,125	-0,208	-0,123	-0,156	-0,071	-0,194	-0,159	-0,121	-0,121
25	-0,180	-0,119	-0,117	-0,123	-0,141	-0,226	-0,130	-0,173	-0,082	-0,190	-0,181	-0,127	-0,127
28	-0,180	-0,106	-0,155	-0,125	-0,110	-0,200	-0,119	-0,145	-0,061	-0,158	-0,161	-0,106	-0,106

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.17.**  
**Deformación unitaria de las muestras de 210 Kg/cm<sup>2</sup>**

Día	Deformación unitaria (mm/mm) x10 <sup>-6</sup>												
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10	M 11	M 12	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-146,67	100,00	-90,00	26,67	-26,67	-43,33	-66,67	-63,33	-6,67	-136,67	-120,00	-56,67	-56,67
3	-216,67	26,67	-200,00	-23,33	-90,00	-143,33	-173,33	-103,33	-63,33	-273,33	-130,00	-133,33	-133,33
7	-493,33	-173,33	0,00	-320,00	-323,33	-496,67	-346,67	-403,33	-253,33	-493,33	-490,00	-390,00	-390,00
8	-490,00	-310,00	-256,67	-203,33	-286,67	-470,00	-370,00	-420,00	-160,00	-470,00	-426,67	-306,67	-306,67
9	-543,33	-276,67	-270,00	-286,67	-280,00	-540,00	-326,67	-426,67	-236,67	-380,00	-366,67	-316,67	-316,67
10	-543,33	-303,33	-260,00	-466,67	-346,67	-556,67	-366,67	-453,33	-250,00	-593,33	-510,00	-366,67	-366,67
11	-543,33	-286,67	-273,33	-453,33	-333,33	-623,33	-343,33	-426,67	-226,67	-473,33	-483,33	-333,33	-333,33
15	-563,33	-306,67	-346,67	-450,00	-320,00	-606,67	-420,00	-433,33	-193,33	-546,67	-466,67	-393,33	-393,33
16	-556,67	-310,00	-366,67	-480,00	-353,33	-683,33	-443,33	-440,00	-203,33	-526,67	-510,00	-333,33	-333,33
17	-590,00	-383,33	-380,00	-626,67	-400,00	-696,67	-373,33	-500,00	-256,67	-663,33	-540,00	-363,33	-363,33
18	-586,67	-333,33	-413,33	-646,67	-426,67	-696,67	-436,67	-476,67	-256,67	-636,67	-563,33	-360,00	-360,00
21	-560,00	-320,00	-413,33	-520,00	-400,00	-690,00	-430,00	-480,00	-250,00	-630,00	-536,67	-416,67	-416,67
22	-573,33	-370,00	-410,00	-526,67	-413,33	-766,67	-423,33	-486,67	-250,00	-653,33	-543,33	-450,00	-450,00
23	-586,67	-340,00	-440,00	-426,67	-376,67	-720,00	-430,00	-513,33	-256,67	-623,33	-553,33	-406,67	-406,67
24	-616,67	-340,00	-423,33	-416,67	-416,67	-693,33	-410,00	-520,00	-236,67	-646,67	-530,00	-403,33	-403,33
25	-600,00	-396,67	-390,00	-410,00	-470,00	-753,33	-433,33	-576,67	-273,33	-633,33	-603,33	-423,33	-423,33
28	-600,00	-353,33	-516,67	-416,67	-366,67	-666,67	-396,67	-483,33	-203,33	-526,67	-536,67	-353,33	-353,33

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.18.**  
*Deformación de las muestras de 250 Kg/cm<sup>2</sup>*

Día	Deformación (mm)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	-0,057	-0,093	-0,081	-0,082	-0,098	-0,119	-0,087	-0,084	-0,073	-0,066	-0,076	-0,103	-0,103
6	-0,072	-0,100	-0,089	-0,100	-0,103	-0,120	-0,100	-0,093	-0,084	-0,081	-0,098	-0,108	-0,108
7	-0,088	-0,107	-0,101	-0,107	-0,120	-0,142	-0,114	-0,101	-0,103	-0,093	-0,107	-0,117	-0,117
8	-0,087	-0,114	-0,103	-0,115	-0,121	-0,156	-0,109	-0,101	-0,105	-0,096	-0,116	-0,133	-0,133
9	-0,097	-0,117	-0,105	-0,120	-0,133	-0,158	-0,116	-0,102	-0,110	-0,112	-0,119	-0,145	-0,145
13	-0,108	-0,140	-0,125	-0,140	-0,148	-0,181	-0,137	-0,123	-0,130	-0,143	-0,138	-0,167	-0,167
14	-0,112	-0,142	-0,130	-0,148	-0,154	-0,192	-0,143	-0,129	-0,132	-0,130	-0,141	-0,171	-0,171
15	-0,113	-0,143	-0,127	-0,154	-0,158	-0,196	-0,144	-0,130	-0,137	-0,137	-0,143	-0,179	-0,179
16	-0,124	-0,147	-0,135	-0,150	-0,163	-0,196	-0,148	-0,135	-0,135	-0,140	-0,151	-0,179	-0,179
19	-0,122	-0,146	-0,134	-0,150	-0,164	-0,208	-0,151	-0,137	-0,130	-0,142	-0,146	-0,181	-0,181
20	-0,125	-0,147	-0,133	-0,159	-0,175	-0,211	-0,158	-0,143	-0,139	-0,158	-0,145	-0,185	-0,185
21	-0,127	-0,152	-0,133	-0,160	-0,179	-0,216	-0,160	-0,141	-0,143	-0,145	-0,152	-0,187	-0,187
22	-0,135	-0,157	-0,138	-0,168	-0,186	-0,222	-0,161	-0,143	-0,141	-0,148	-0,148	-0,200	-0,200
23	-0,132	-0,157	-0,144	-0,170	-0,185	-0,226	-0,167	-0,154	-0,159	-0,160	-0,163	-0,209	-0,209
28	-0,138	-0,162	-0,147	-0,173	-0,188	-0,233	-0,172	-0,151	-0,155	-0,163	-0,153	-0,210	-0,210

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.19.**  
**Deformación unitaria de las muestras de 250 Kg/cm<sup>2</sup>**

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Deformación unitaria (mm/mm) x10 <sup>-6</sup>											
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	-190,00	-310,00	-270,00	-273,33	-326,67	-396,67	-290,00	-280,00	-243,33	-220,00	-253,33	-343,33
6	-240,00	-333,33	-296,67	-333,33	-343,33	-400,00	-333,33	-310,00	-280,00	-270,00	-326,67	-360,00
7	-293,33	-356,67	-336,67	-356,67	-400,00	-473,33	-380,00	-336,67	-343,33	-310,00	-356,67	-390,00
8	-290,00	-380,00	-343,33	-383,33	-403,33	-520,00	-363,33	-336,67	-350,00	-320,00	-386,67	-443,33
9	-323,33	-390,00	-350,00	-400,00	-443,33	-526,67	-386,67	-340,00	-366,67	-373,33	-396,67	-483,33
13	-360,00	-466,67	-416,67	-466,67	-493,33	-603,33	-456,67	-410,00	-433,33	-476,67	-460,00	-556,67
14	-373,33	-473,33	-433,33	-493,33	-513,33	-640,00	-476,67	-430,00	-440,00	-433,33	-470,00	-570,00
15	-376,67	-476,67	-423,33	-513,33	-526,67	-653,33	-480,00	-433,33	-456,67	-456,67	-476,67	-596,67
16	-413,33	-490,00	-450,00	-500,00	-543,33	-653,33	-493,33	-450,00	-450,00	-466,67	-503,33	-596,67
19	-406,67	-486,67	-446,67	-500,00	-546,67	-693,33	-503,33	-456,67	-433,33	-473,33	-486,67	-603,33
20	-416,67	-490,00	-443,33	-530,00	-583,33	-703,33	-526,67	-476,67	-463,33	-526,67	-483,33	-616,67
21	-423,33	-506,67	-443,33	-533,33	-596,67	-720,00	-533,33	-470,00	-476,67	-483,33	-506,67	-623,33
22	-450,00	-523,33	-460,00	-560,00	-620,00	-740,00	-536,67	-476,67	-470,00	-493,33	-493,33	-666,67
23	-440,00	-523,33	-480,00	-566,67	-616,67	-753,33	-556,67	-513,33	-530,00	-533,33	-543,33	-696,67
28	-460,00	-540,00	-490,00	-576,67	-626,67	-776,67	-573,33	-503,33	-516,67	-543,33	-510,00	-700,00

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.2.1. Consistencia de las mediciones

En la tabla 4.20 se muestra los valores de la consistencia estadística de cada una de las muestras para la resistencia característica de  $210 \text{ Kg/cm}^2$  y en la fig.4.1. se muestra su representación gráfica, las tablas fueron elaboradas a partir de los datos del anexo A 12.

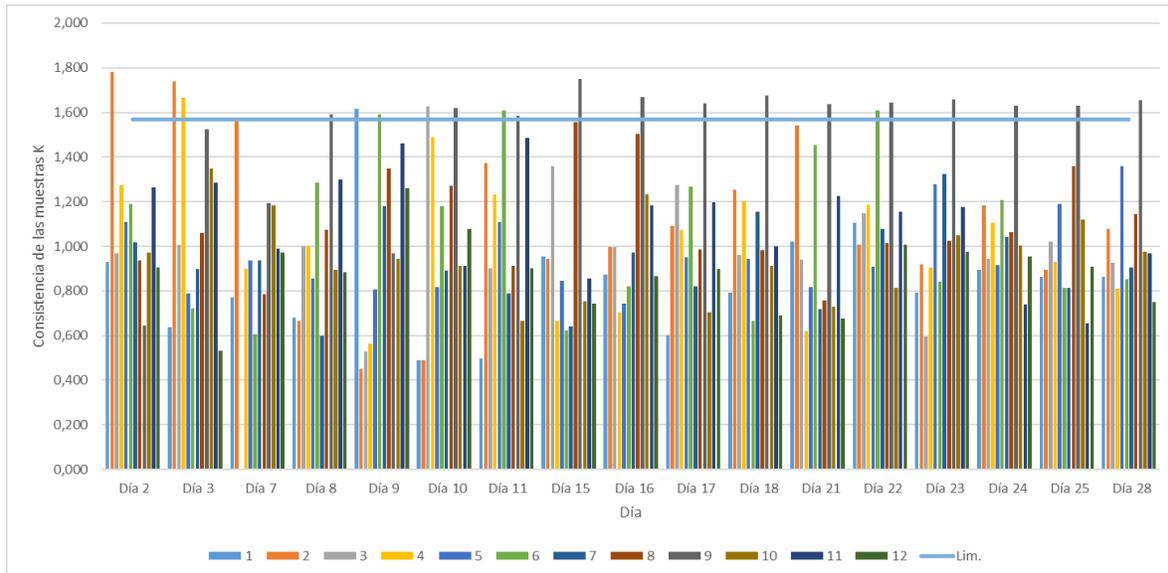
**Tabla 4.20.**  
*Consistencia estadística de las muestras "K" de  $F_{ck}$  210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Día	Muestras												Lim.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Día 2	0,931	1,783	0,967	1,276	1,107	1,190	1,017	0,935	0,643	0,973	1,263	0,905	1,570
Día 3	0,638	1,741	1,005	1,666	0,790	0,723	0,897	1,061	1,523	1,347	1,286	0,531	1,570
Día 7	0,771	1,560	0,000	0,899	0,937	0,606	0,937	0,785	1,192	1,184	0,989	0,973	1,570
Día 8	0,679	0,666	0,999	0,999	0,855	1,284	0,599	1,075	1,592	0,893	1,299	0,883	1,570
Día 9	1,617	0,449	0,527	0,564	0,805	1,590	1,181	1,348	0,970	0,944	1,460	1,262	1,570
Día 10	0,489	0,489	1,625	1,490	0,818	1,181	0,890	1,272	1,618	0,913	0,913	1,079	1,570
Día 11	0,497	1,375	0,900	1,231	1,111	1,610	0,788	0,912	1,585	0,664	1,484	0,903	1,570
Día 15	0,953	0,944	1,360	0,665	0,845	0,624	0,640	1,555	1,749	0,753	0,857	0,743	1,570
Día 16	0,874	0,997	0,997	0,702	0,743	0,821	0,973	1,502	1,668	1,233	1,182	0,865	1,570
Día 17	0,602	1,090	1,276	1,072	0,950	1,266	0,820	0,987	1,641	0,704	1,196	0,898	1,570
Día 18	0,791	1,253	0,960	1,200	0,945	0,667	1,156	0,983	1,676	0,911	0,998	0,691	1,570
Día 21	1,021	1,542	0,941	0,621	0,815	1,455	0,717	0,757	1,636	0,730	1,226	0,675	1,570
Día 22	1,104	1,007	1,147	1,186	0,910	1,608	1,078	1,014	1,644	0,814	1,156	1,007	1,570
Día 23	0,792	0,919	0,597	0,904	1,277	0,842	1,323	1,024	1,657	1,050	1,178	0,976	1,570
Día 24	0,894	1,184	0,943	1,105	0,916	1,207	1,044	1,063	1,628	1,002	0,738	0,955	1,570
Día 25	0,862	0,894	1,022	0,930	1,189	0,813	0,813	1,360	1,631	1,118	0,656	0,908	1,570
Día 28	0,864	1,078	0,926	0,811	1,359	0,853	0,906	1,145	1,655	0,975	0,968	0,751	1,570

Fuente: Elaboración propia.

Nota: el valor del límite de "fue obtenida de la tabla 2.17. entrando con un número de mediciones  $n=10$  y un número de muestras de  $p=12$

**Fig. 4.1.**  
**Consistencia estadística de las muestras “k”  $F_{ck}$  210 Kg/cm<sup>2</sup>**



Fuente: Elaboración propia

De la fig. 4.1. se puede observar que durante el periodo de estudio la muestra nueve llego a presentar más de tres valores de “k” que superaron el límite aceptable por lo cual esta muestra será descartada durante todo el periodo de estudio, con respecto a las otras muestras simplemente se omitirá en el promedio de las mediciones aquellos datos que excedieron el límite aceptable de “k” de acuerdo como lo indica el ensayo ASTM C 157.

En la tabla 4.21. se muestra los valores de la consistencia estadística de cada una de las muestras para la resistencia característica de 250 Kg/cm<sup>2</sup> y en la fig.4.2. se muestra su representación gráfica.

**Tabla 4.21.**  
**Consistencia estadística de las muestras “K” de  $F_{ck}$  250 Kg/cm<sup>2</sup>**

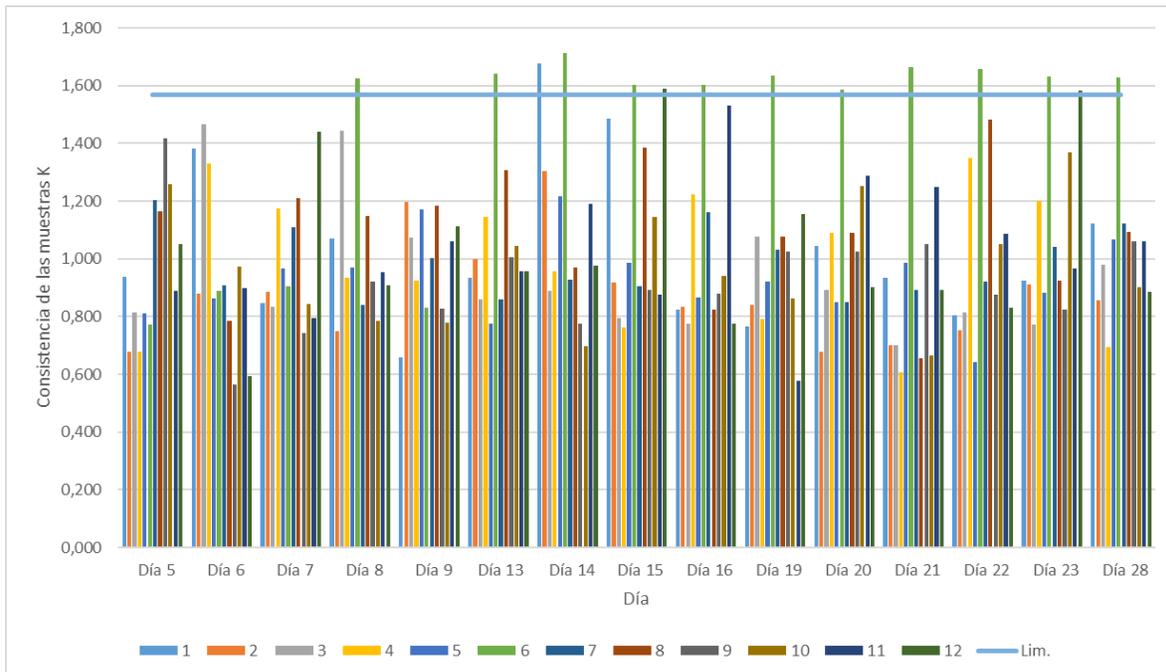
Día	Muestras												Lim.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Día 5	0,936	0,678	0,814	0,678	0,811	0,773	1,203	1,164	1,418	1,258	0,888	1,050	1,570
Día 6	1,382	0,879	1,465	1,331	0,863	0,890	0,908	0,784	0,565	0,973	0,897	0,593	1,570
Día 7	0,848	0,886	0,834	1,174	0,966	0,906	1,110	1,212	0,744	0,845	0,793	1,439	1,570
Día 8	1,071	0,749	1,443	0,933	0,970	1,626	0,841	1,147	0,921	0,784	0,955	0,908	1,570
Día 9	0,659	1,199	1,074	0,923	1,172	0,830	1,003	1,185	0,828	0,778	1,060	1,112	1,570
Día 13	0,935	0,999	0,860	1,145	0,775	1,641	0,860	1,307	1,007	1,045	0,956	0,956	1,570
Día 14	1,677	1,304	0,889	0,957	1,215	1,714	0,927	0,969	0,776	0,697	1,192	0,976	1,570
Día 15	1,486	0,919	0,793	0,763	0,987	1,603	0,904	1,385	0,893	1,146	0,875	1,591	1,570
Día 16	0,823	0,835	0,777	1,223	0,868	1,602	1,163	0,823	0,878	0,940	1,531	0,777	1,570
Día 19	0,764	0,840	1,077	0,791	0,920	1,636	1,033	1,077	1,025	0,864	0,576	1,153	1,570
Día 20	1,045	0,677	0,893	1,089	0,851	1,585	0,851	1,089	1,026	1,251	1,288	0,903	1,570
Día 21	0,936	0,702	0,700	0,606	0,985	1,665	0,894	0,657	1,051	0,666	1,248	0,894	1,570
Día 22	0,805	0,752	0,814	1,349	0,642	1,659	0,921	1,483	0,877	1,050	1,087	0,831	1,570
Día 23	0,923	0,912	0,771	1,201	0,883	1,630	1,042	0,923	0,824	1,368	0,968	1,582	1,570
Día 28	1,123	0,857	0,981	0,695	1,067	1,628	1,123	1,095	1,059	0,903	1,059	0,885	1,570

Fuente: Elaboración propia.

Nota: el valor del límite de “fue obtenida de la tabla 2.17. entrando con un número de mediciones n=10 y un número de muestras de p=12

Fig. 4.2.

*Consistencia estadística de las muestras “k”  $F_{ck}$  250 Kg/cm<sup>2</sup>*



Fuente: Elaboración propia

De la fig. 4.2. se observa que durante los veintiocho días de medición solamente la muestra seis presento más de tres valores de “k” que superaron el límite aceptable de “k”, por lo cual esta será descartada durante todo el periodo de estudio, con respecto a las otras muestras simplemente se omitirán en el promedio de las mediciones aquellos datos que excedieron el límite aceptable de “k” de acuerdo como lo indica el ensayo ASTM C 157.

#### 4.3.2.2. Deformación versus el tiempo

El objeto del estudio es observar el comportamiento de la retracción por secado del hormigón, observando cómo se da este fenómeno durante un tiempo de 28 días, los valores medidos de la retracción se pueden observar en la tabla 4.22. y 4.23. para las resistencias de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y 250 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente y son expresadas como deformaciones unitarias tal como indica el ensayo ASTM C 157, estas deformaciones fueron calculadas del promedio de las muestras que eran consistentes estadísticamente.

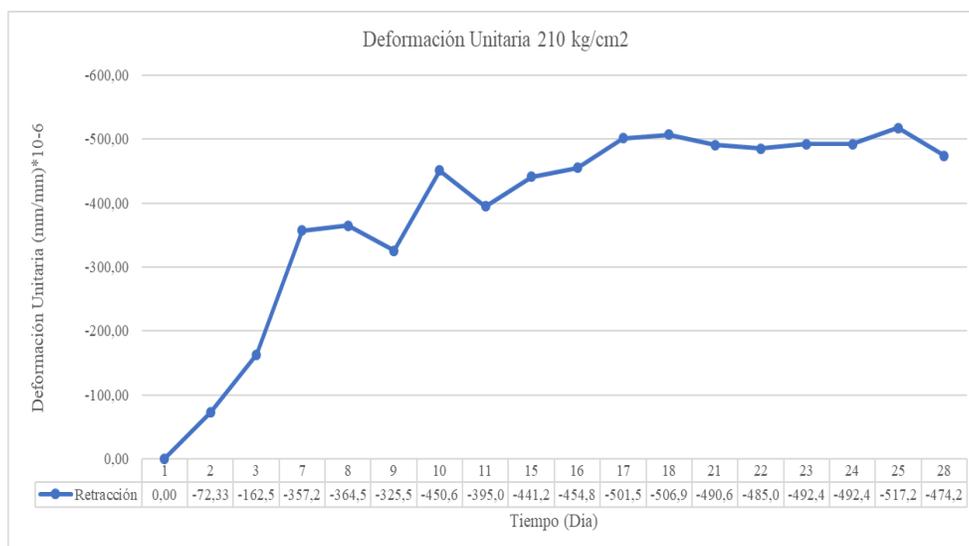
**Tabla 4.22.**  
**Deformación Unitaria 210 Kg/cm<sup>2</sup>**

Día	Deformación Unitaria (mm/mm) *10 <sup>-6</sup>
1	0,00
2	-72,33
3	-162,59
7	-357,27
8	-364,55
9	-325,56
10	-450,67
11	-395,00
15	-441,21
16	-454,85
17	-501,52
18	-506,97
21	-490,61
22	-485,00
23	-492,42
24	-492,42
25	-517,27
28	-474,24

Fuente: Elaboración propia.

**Fig. 4.3.**

**Retracción vs tiempo 210 Kg/cm<sup>2</sup>**



Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de la mezcla para medir la retracción por secado fueron las siguientes:

- Forma: Prisma rectangular
- Tamaño máximo del agregado grueso: 19,05 mm
- Contenido de cemento: 368,04 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de agua: 184,01 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de grava: 989,64 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de arena: 786,52 Kg/m<sup>3</sup>
- Porcentaje de agregados: 65,7 %
- Relación agua/cemento: 0,56
- Contenido de aire: 2%

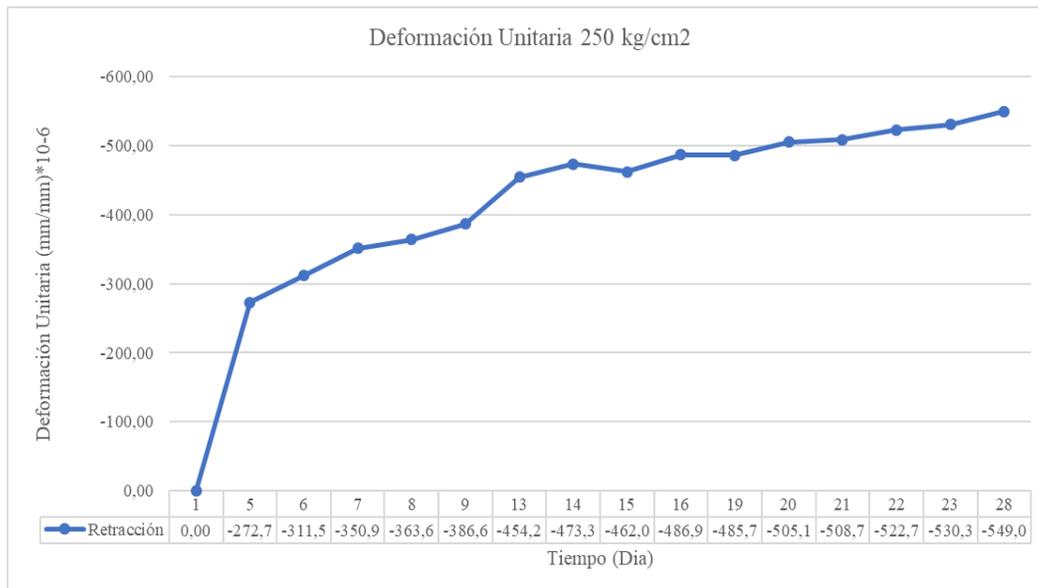
De la fig. 4.3. se puede observar que entre el día uno y el día diez la retracción del hormigón llevo a alcázar más de la mitad de la retracción producida a lo largo de los veintiocho días.

**Tabla 4.23.**  
***Deformación Unitaria 250 Kg/cm<sup>2</sup>***

Día	Deformación Unitaria (mm/mm) *10 <sup>-6</sup>
1	0,00
5	-272,73
6	-311,52
7	-350,91
8	-363,64
9	-386,67
13	-454,24
14	-473,33
15	-462,00
16	-486,97
19	-485,76
20	-505,15
21	-508,79
22	-522,73
23	-530,33
28	-549,09

Fuente: Elaboración propia

**Fig. 4.4.**  
**Retracción vs tiempo 250 Kg/cm<sup>2</sup>**



Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de la mezcla para medir la retracción por secado fueron las siguientes:

- Forma: Prisma rectangular
- Tamaño máximo del agregado grueso: 19,05 mm
- Contenido de cemento: 409,18 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de agua: 185,12 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de grava: 989,64 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de arena: 751,36 Kg/m<sup>3</sup>
- Cantidad de agregados: 64,4 %
- Relación agua/cemento: 0,50
- Contenido de aire: 2%

De la fig. 4.4. se puede observar que entre el día uno y el día trece se desarrolla la mayor retracción de todo el periodo de estudio.

Analizando las condiciones de las mezclas de los hormigones se puede observar que a mayor resistencia requerida la retracción se puede incrementar, debido a que se requiere más cantidad de cemento y agua, y al requerir más cantidad de estos materiales la retracción será mayor

### 4.3.3. Variación del peso debido a la retracción

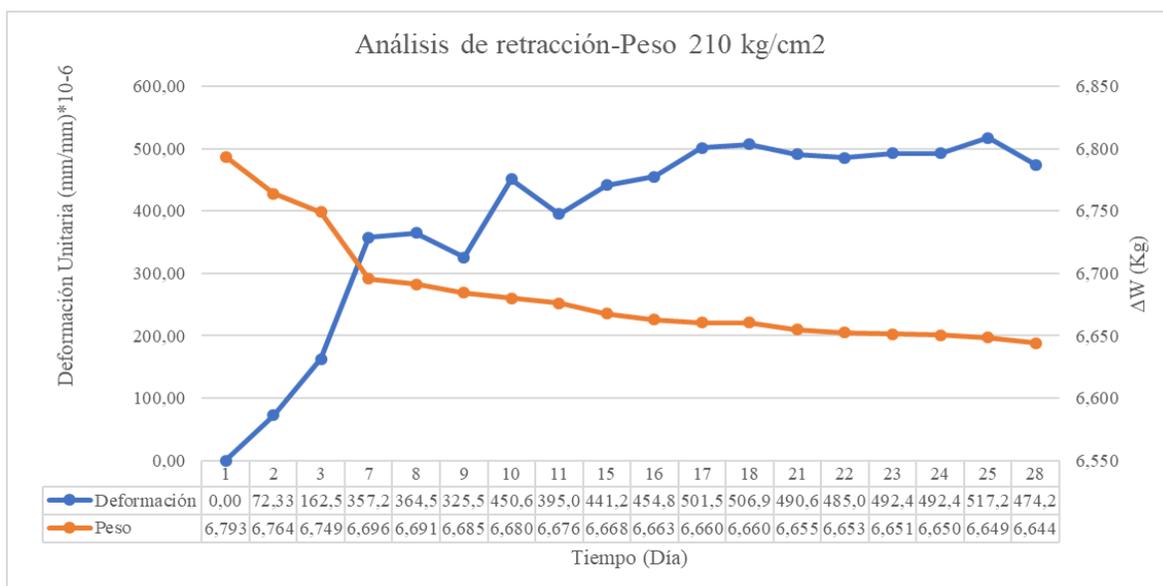
En las tablas 4.24. y 4.25. se puede observar las deformaciones y como varía el peso de las muestras, mismas que fueron registradas durante cada día de medición de las muestras, con dichos datos registrados se elaboran las fig. 4.5. y 4.6.

**Tabla 4.24.**

*La retracción y la variación del peso para muestras de 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Día	Deformación Unitaria (mm/mm) *10-6	Humedad relativa %	Temperatura °C	Peso muestra (Kg)
1	0,00	0,00	0,00	6,793
2	72,33	31,00	26,00	6,764
3	162,59	42,00	25,00	6,749
7	357,27	26,00	20,00	6,696
8	364,55	41,00	22,00	6,691
9	325,56	21,00	23,00	6,685
10	450,67	55,00	23,00	6,680
11	395,00	63,00	19,00	6,676
15	441,21	31,00	14,00	6,668
16	454,85	39,00	17,00	6,663
17	501,52	32,00	20,00	6,660
18	506,97	58,00	17,00	6,660
21	490,61	66,00	18,00	6,655
22	485,00	46,00	19,00	6,653
23	492,42	52,00	18,00	6,651
24	492,42	57,00	18,00	6,650
25	517,27	50,00	24,00	6,649
28	474,24	48,00	12,00	6,644
	Prom.	45,44	19,71	

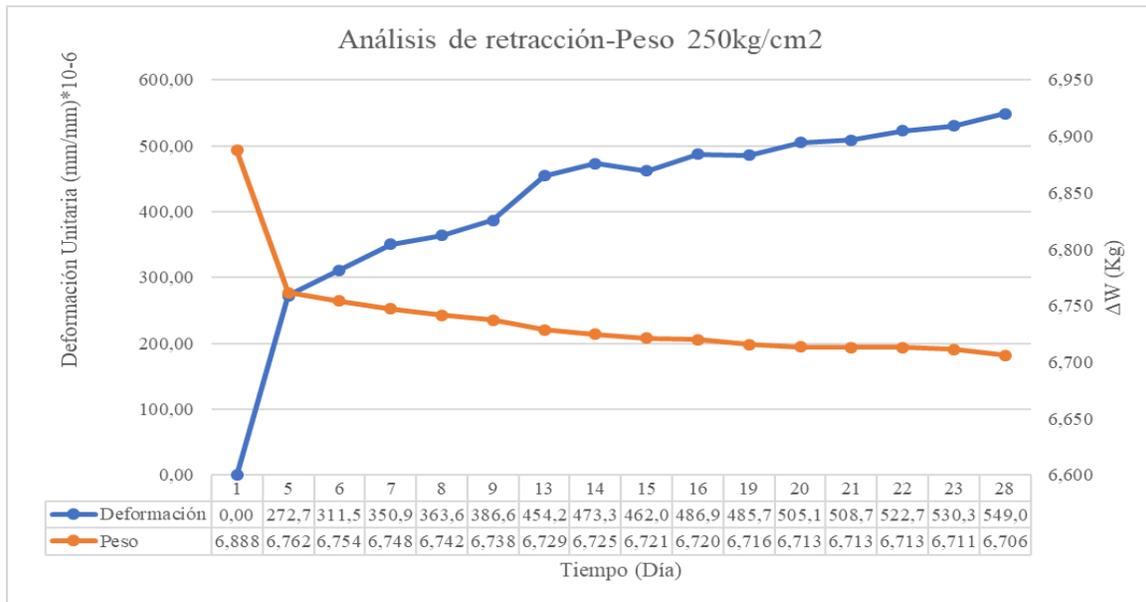
Fuente: Elaboración propia.

**Fig. 4.5. Análisis de retracción-Peso 210 Kg/cm<sup>2</sup>****Tabla 4.25. La retracción y la variación del peso para muestras de 250 Kg/cm<sup>2</sup>**

Día	Deformación Unitaria (mm/mm) *10-6	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)	Peso muestra (Kg)
1	0,00	0,00	0,00	6,888
5	272,73	26,00	20,00	6,762
6	311,52	41,00	22,00	6,754
7	350,91	21,00	23,00	6,748
8	363,64	55,00	23,00	6,742
9	386,67	63,00	19,00	6,738
13	454,24	31,00	14,00	6,729
14	473,33	39,00	17,00	6,725
15	462,00	32,00	20,00	6,721
16	486,97	58,00	17,00	6,720
19	485,76	66,00	18,00	6,716
20	505,15	46,00	19,00	6,713
21	508,79	52,00	18,00	6,713
22	522,73	57,00	18,00	6,713
23	530,33	50,00	24,00	6,711
28	549,09	37,00	19,00	6,706
	Prom.	44,93	19,40	

Fuente: Elaboración propia.

**Fig. 4.6.**  
**Análisis de retracción-Peso 250 Kg/cm<sup>2</sup>**



Fuente: Elaboración propia

De las fig. 4.12. y 4.13. se puede contrastar lo que se mencionó como definición de la retracción, que es la pérdida paulatina del agua a lo largo del tiempo, producto de ello se dan las deformaciones por retracción por secado.

#### 4.4. Modelos predictivos de retracción por secado considerados por el comité ACI

##### 209.2R-08

Los modelos predictivos para la retracción por secado requieren de los datos que se muestran en la tabla 4.26. y 4.27. para las resistencias de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y 250 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente.

**Tabla 4.26.***Datos requeridos para uso de los modelos predictivos 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Datos concretos:	Unidades SI		
Resistencia especificada a los 28 días	$F_c' =$	21	MPa
Condiciones ambientales:			
Humedad relativa	$h =$	0,45	
Temperatura	$T =$	19,71	°C
Muestra:			
Relación de volumen-superficie	$V / S =$	21,43	mm
Forma		Prisma cuadrado	
Curado inicial			
Tiempo de curado	$t_c =$	1	
Condiciones de curado		curado en condiciones húmedas	
Tipo de cemento		I	
Tamaño máximo del árido		19,05	mm
El contenido de cemento	$c =$	368,04	kg/m <sup>3</sup>
Contenido de agua	$w =$	184,01	kg/m <sup>3</sup>
Relación agua-cemento	$w / c =$	0,56	
Proporción de áridos y cemento	$a / c =$	4,83	
Porcentaje de agregado fino	$\psi =$	29,48	%
El contenido de aire	$\alpha =$	2	%
Asentamiento	$s =$	60	mm
Peso unitario del concreto	$\gamma_c =$	2445,88	kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.27.***Datos requeridos para uso de los modelos predictivos 250 Kg/cm<sup>2</sup>*

Datos concretos:	Unidades SI		
Resistencia especificada a los 28 días	$F_c' =$	25	MPa
Condiciones ambientales:			
Humedad relativa	$h =$	0,45	
Temperatura	$T =$	19,40	°C
Muestra:			
Relación de volumen-superficie	$V / S =$	21,43	mm
Forma	Prisma cuadrado		
Curado inicial			
Tiempo de curado	$t_c =$	1	
Condiciones de curado	curado en condiciones húmedas		
Tipo de cemento	I		
Tamaño máximo del árido		19,05	mm
El contenido de cemento	$c =$	409,18	kg/m <sup>3</sup>
Contenido de agua	$w =$	185,12	kg/m <sup>3</sup>
Relación agua-cemento	$w / c =$	0,50	
Proporción de áridos y cemento	$a / c =$	4,25	
Porcentaje de agregado fino	$\psi =$	28,16	%
El contenido de aire	$\alpha =$	2	%
Asentamiento	$s =$	50	mm
Peso unitario del concreto	$\gamma_c =$	2480,14	kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia.

**4.4.1. Modelo ACI 209R-92**

Las tablas 4.28. y 4.29. muestra los resultados de la deformación unitaria para los días 7, 14 y 28 que de acuerdo al ensayo ASTM C157 son los días de control.

**Tabla 4.28.***Retracción calculada por ACI 209R-92 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-115
14	-207
28	-320

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4.29.***Retracción calculada por ACI 209R-92 250 Kg/cm<sup>2</sup>*

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-114
14	-205
28	-317

Fuente: Elaboración propia

**4.4.2. Modelo Bažant-Baweja B3**

Las tablas 4.30. y 4.31. muestra los resultados de la deformación unitaria para los días 7, 14 y 28.

**Tabla 4.30.***Retracción calculada por Bažant-Baweja B3 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-194
14	-284
28	-402

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.31.*****Retracción calculada por Bažant-Baweja B3 250 Kg/cm<sup>2</sup>***

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-195
14	-285
28	-403

Fuente: Elaboración propia

**4.4.3. Modelo CEB MC90-99**

Las tablas 4.32. y 4.33. muestra los resultados de la deformación unitaria para los días 7, 14 y 28.

**Tabla 4.32.*****Retracción calculada por CEB MC90-99 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-201
14	-282
28	-374

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.33.*****Retracción calculada por CEB MC90-99 250 Kg/cm<sup>2</sup>***

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-191
14	-269
28	-356

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.4. Modelo GL2000

Las tablas 4.34. y 4.35. muestra los de la deformación unitaria para los días 7, 14 y 28.

**Tabla 4.34.**

*Retracción calculada por GL2000 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-294
14	-411
28	-539

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.35.**

*Retracción calculada por GL2000 250 Kg/cm<sup>2</sup>*

Tiempo (Día)	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>
7	-272
14	-379
28	-498

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.5. Análisis comparativo de los resultados

Los resultados de análisis serán las mediciones medidas en laboratorio y las calculadas por los modelos de estimación para los días 7, 14 y 28, mismas que se encuentran resumidas en las tablas 4.36. y 4.37. para las resistencias de 210 Kg/cm<sup>2</sup> y 250 Kg/cm<sup>2</sup> respectivamente.

**Tabla 4.36. Resultado de las mediciones de laboratorio y de los modelos de estimación**  
*210 Kg/cm<sup>2</sup>*

Día	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>				
	Laboratorio	ACI 209R- 92	Bažant Baweja B3	CEB MC90 -99	GL200 0
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	-357,27	-115	-194	-201	-294
14	-441,21	-207	-284	-282	-411
28	-474,24	-320	-402	-374	-539

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.37.

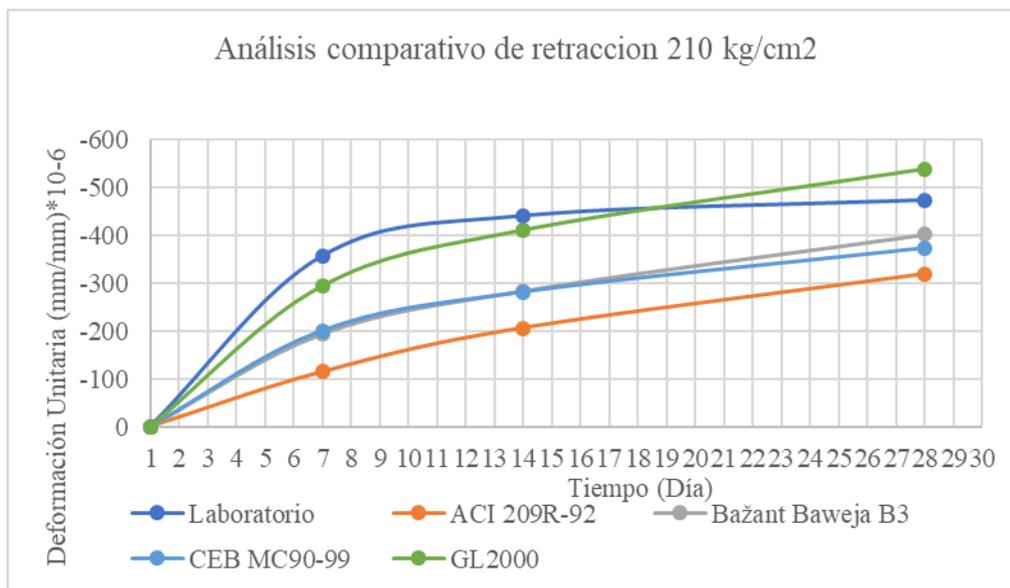
**Resultado de las mediciones de laboratorio y de los modelos de estimación 250 Kg/cm<sup>2</sup>**

Día	Deformación Unitaria (mm/mm)*10 <sup>-6</sup>				
	Laboratorio	ACI 209R-92	Bažant Baweja B3	CEB MC90-99	GL2000
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	-350,91	-114	-195	-191	-272
14	-473,33	-205	-285	-269	-379
28	-549,09	-317	-403	-356	-498

Fuente: Elaboración propia.

Fig. 4.7.

**Análisis comparativo de los modelos predictivos 210 Kg/cm<sup>2</sup>**



Fuente: Elaboración propia

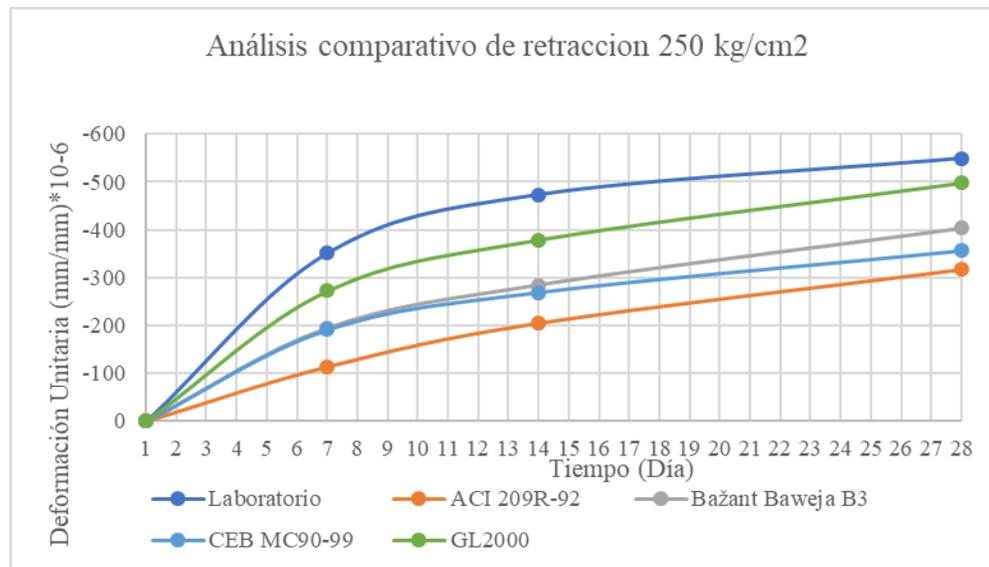
Si se analiza la tabla 4.36. de los 4 modelos de predicción para la retracción por secado se puede observar que para las muestras de 210 Kg/cm<sup>2</sup> el modelo de predicción ACI 209R-92 está muy alejado de la deformación medida en laboratorio, siendo la más alejada comparada con los otros modelos de predicción.

Los modelos de Bažant y CEB MC 90-99 arrojan valores cercanos entre ellos observando los días 7 y 14, sin embargo, a partir del día 28 el modelo de Bažant presenta una deformación cercana al medido en laboratorio, si se analiza la fig. 4.7. se puede evidenciar que las curvas de estos dos modelos de estimación se sobrepone llegando únicamente a sobrepasar la curva del modelo de Bažant en el día 28.

El modelo GL 2000 es el modelo de predicción que arroja valores más cercanos a los medidos en laboratorio siendo la variación de retracción entre ellos menores a 70 micro deformaciones con respecto a los días 7, 14 y 28, si se observa ambas curvas en la fig. 4.7. a partir del día 28 esta se incrementa habiendo una sobreestimación de la retracción.

**Fig. 4.8.**

***Análisis comparativo de los modelos predictivos 250 Kg/cm<sup>2</sup>***



Fuente: Elaboración propia

De la tabla 4.37. se observa notoriamente que la retracción considerada por el modelo de predicción ACI 209R-92 al igual que la tabla 4.36. está alejado de la deformación medida en laboratorio.

Los modelos de Bažant y CEB MC 90-99 siguen la misma tendencia de análisis que las muestras de 210 Kg/cm<sup>2</sup> es decir que estos modelos presentan valores cercanos entre ellos, llegando a sobreponerse hasta el día 14, sin embargo, a partir del día 28 la curva de deformación de Bažant se separa del otro modelo que se puede observar de mejor manera fig. 4.8, sin embargo, ambos modelos siguen estimando valores alejados de los medidos en laboratorio.

El modelo GL 2000 es el modelo de predicción más próximo a los medidos en laboratorio siendo la variación de retracción entre ellos menores a 100 micro deformaciones con respecto a los días 7 y 14, si se observa ambas curvas en la fig. 4.8. estas se empiezan a unir y en el día 28 el modelo GL 2000 presenta una diferencia menor a 60 micro deformaciones.

Del análisis de las fig. 4.7. y 4.8. se puede ver que en algún momento o tiempo la curva de 250 Kg/cm<sup>2</sup> del modelo GL 2000 podría sobrepasar la curva de retracción medida en laboratorio.

Con ayuda de las tablas 4.38. y 4.39. se puede observar cuánto varía en porcentaje lo valores estimados respecto del medido en laboratorio.

**Tabla 4.38.**

***Variación porcentual de la retracción estimados por los modelos respecto de los medidos en laboratorio para 210 Kg/cm<sup>2</sup>***

Día	ACI 209R-92 (%)	Bažant Baweja B3 (%)	CEB MC90-99 (%)	GL2000 (%)
7	67,81	45,70	43,74	17,71
14	53,08	35,63	36,08	6,85
28	32,52	15,23	21,14	-13,66

Fuente: Elaboración propia.

Nota: el signo negativo indica una sobreestimación de la retracción

De la tabla 4.38. se puede apreciar que a lo largo de los 28 días el modelo ACI 209R-92 es el que mayor error o sobreestimación presenta comparado con los medidos en laboratorio.

El modelo GL 2000 es el que llega a estimar en mejor medida la retracción pues para los 28 días su retracción varia menos de un 30%.

**Tabla 4.39.**

***Variación porcentual de la retracción estimados por los modelos respecto de los medidos en laboratorio para 250 Kg/cm<sup>2</sup>***

Día	ACI 209R-92 (%)	Bažant Baweja B3 (%)	CEB MC90 (%)	GL2000 (%)
7	67,51	44,43	45,57	22,49
14	56,69	39,79	43,17	19,93
28	42,27	26,61	35,17	9,30

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 4.39. se puede apreciar que al igual que en la tabla 4.38. el modelo ACI209R-92 llega a sobreestimar la retracción.

El modelo GL 2000 es el que llega a estimar en mejor medida la retracción pues para los 28 días su retracción varía menos de un 30%.

#### 4.5. Contrastación de la hipótesis

Como se planteó en la hipótesis (1.5.) los resultados pueden demostrar:

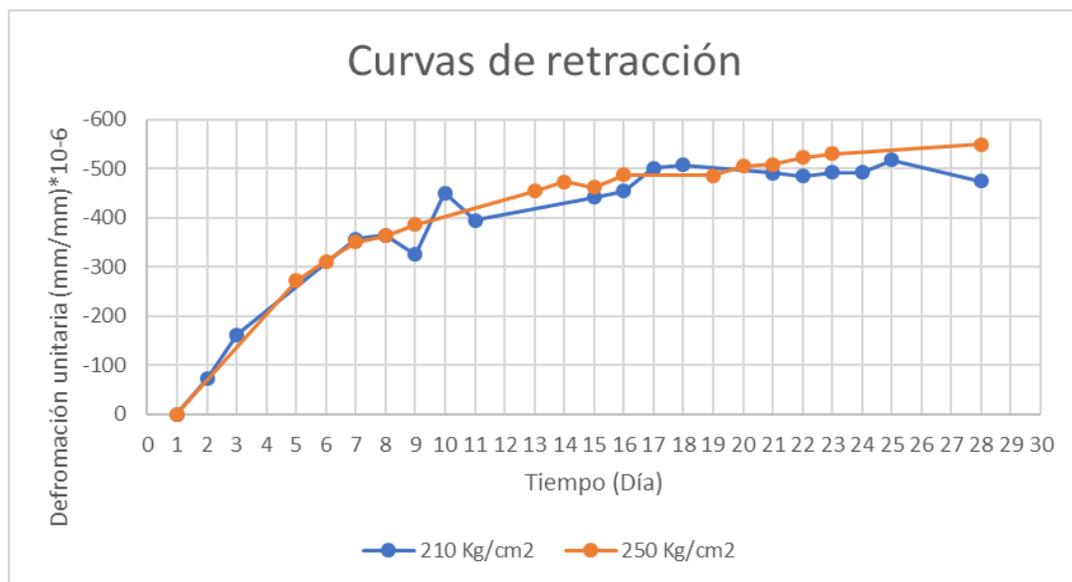
H 1, (hipótesis de investigación) “Conociendo las deformaciones reales del hormigón a través de mediciones, establece que conforme aumenta el tiempo de secado mayor será la retracción.”

H 0, (hipótesis nula), “Conociendo las deformaciones reales del hormigón a través de mediciones, establece que conforme aumenta el tiempo de secado menor será la retracción.”

Con ayuda de la fig. 4.9. se puede apreciar cómo se da la retracción a lo largo del tiempo para los dos tipos de hormigones que se estudiaron.

**Fig. 4.9.**

#### *Análisis de retracción de los hormigones*



Como se pudo observar en la figura anterior se puede afirmar que conforme va aumentando el tiempo de secado del hormigón la retracción va aumentando, dando validez a la hipótesis (H 1) planteada de la investigación.

#### **4.6.Especificación técnica para la medición de la retracción y procesamiento de datos**

Este método está desarrollado para evaluar el comportamiento de la retracción por secado para cualquier resistencia requerida

##### **4.6.1. Aparato**

- Se va a requerir el uso de una balanza para medir el peso de las muestras, que tenga una precisión de 1g, y una capacidad como mínima de 10 kg debido a que se ha observado que para dimensiones de las vigas el peso que tenía rondaba aproximadamente los 7kg.
- Deformímetro, utilizado para medir la retracción.
- Comparador patrón, utilizado para calibrar el deformímetro, se caracteriza porque tiene una longitud fija de 300 mm, el cual sirve como referencia para ver cuánto fue la variación de longitud respecto de la misma.
- Discos pequeños, que serán pegados en una de las caras de la muestra, el cual es utilizado para apoyar el deformímetro sobre el mismo.

##### **4.6.2. Procedimiento para el uso de los aparatos**

- Después de haber sido curado las muestras se procede a secar con un paño húmedo quitando la capa de agua de la muestra, seguidamente se procede a marcar en una de las caras el eje medio en la dirección longitudinal de la muestra.
- Una vez realizado el marcado del eje medio, se debe colocar una pequeña capa de pegamento sobre los extremos, esto para evitar que los discos se despeguen del hormigón.
- Después de colocar la capa de pegamento se procede a poner los discos sobre la misma y colocando a su alrededor con pegamento para fijarlo al hormigón, con ayuda del comparador patrón se procede a ubicar el otro disco en el otro extremo realizando el mismo procedimiento que el anterior. Se deberá esperar un día para que haga efecto el pegamento y se puedan desarrollar las primeras deformaciones.
- Para realizar la medición de la retracción se deberá primeramente calibrar el deformímetro, para ello primeramente se debe apoyar las puntas cónicas del deformímetro sobre los extremos del comparador patrón una para después presionar

la tecla “ZERO/ABS” con lo cual la pantalla indicará una lectura de cero y se procede a toma las mediciones de la retracción.

- Para cada muestra de hormigón es recomendable poder realizar las mediciones como mínimo 2 mediciones de acuerdo al ensayo ASTM E 691-05, de tal manera de poder observar que no haya variación entre las mediciones.
- Si en una misma muestra de hormigón se realizan dos o más mediciones es importante poder observar que no se descalibre el indicador digital debido a que es muy sensible, para ello después de cada medición se debe colocar el deformímetro sobre el medidor patrón y si este sigue marcando cero se procede a realizar la siguiente medición, caso contrario se presiona la tecla “ZERO/ABS” para colocarlo nuevamente en cero y recién proceder a realizar la siguiente medición.
- Culminado las mediciones de retracción se procede a pesar las muestras teniendo cuidado de no mover los discos.

#### **4.6.3. Procesamiento de datos**

- Las mediciones registradas deberán ser procesadas estadísticamente, para evaluar su consistencia, si una de las muestras de ensayo es considerada defectuosa se debe desecharla durante todo el periodo de estudio; para considerar defectuosa a la muestra se debe observar los valores de “k” y si la muestra presenta más de tres valores superiores al límite aceptable de “k”, será considerada como defectuosa. No obstante, si se llega a presentar más de una muestra defectuosa, se deberá realizar un nuevo vaciado de muestras y repetir el ensayo para estas nuevas muestras.

Una vez desechadas las muestras defectuosas se deberá realizar el promedio de las muestras durante el día de medición, teniendo en cuenta de no considerar aquellas muestras que tienen un valor que exceda al límite aceptable de “k”, sin embargo, si durante el día en el cual se quiere realizar el promedio se llegan a presentar más de tres datos que superan el valor de “k” aceptable, ese día no será tomado en cuenta en los registros.

- Para evaluar la consistencia se implementa la práctica E 691-05.
- Una vez evaluado la consistencia se procede a realizar el cálculo de la retracción por secado haciendo uso de la Ec. 2.26. y tomando el promedio de las muestras

consistentes para el día de medición, estos datos deberán estar expresados en unidades de  $(\text{mm/mm}) * 10^{-6}$ , también denominadas como microdeformaciones.

- Se debe elaborar las gráficas de retracción versus el tiempo y pérdida del peso versus el tiempo y poder sacar sus conclusiones respectivas del estudio de la retracción por secado.

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## 5.1. Conclusiones

Concluido las labores de laboratorio en el marco de esta investigación se llega a las siguientes conclusiones:

- Realizar el análisis estadístico en el presente trabajo fue importante debido a que, si se quiere realizar promedio de las muestras para un día de medición, aquellas muestras que presentan una inconsistencia podrían alejar al valor real de la retracción. En el procesamiento estadístico de las mediciones se pudo determinar que las muestras de 210 kg/cm<sup>2</sup> solo una de las muestras fue descartada en el estudio de la retracción por lo cual ya no fue tomada en cuenta, en la tabla. 5.1. se puede observar aquellas muestras que presentaron inconsistencia.

**Tabla 5.1.**

*Valores inconsistentes para las muestras de 210 kg/cm<sup>2</sup>*

Día	Muestra	Consistencia “k”	Límite de “k”
2	2	1,783	1,570
3	2	1,741	1,570
9	1 y 6	1,617 y 1,590	1,570
10	3	1,625	1,570
11	6	1,610	1,570
22	6	1,608	1,570

Fuente: Elaboración propia.

Dichos valores inconsistentes no fueron tomados en cuenta para calcular el promedio de retracción durante esos días.

En el caso de las muestras de 250kg/cm<sup>2</sup> se llegó a descartar la muestra seis durante todo el periodo de estudio pues presentó más de tres valores de “k” que excedían el límite aceptable, en la tabla 5.2. se puede observar aquellas muestras que presentaron inconsistencia.

**Tabla 5.2.*****Valores inconsistentes para las muestras de 250 kg/cm<sup>2</sup>***

Día	Muestra	Consistencia “k”	Límite de “k”
14	1	1,677	1,570
15	12	1,591	1,570
23	12	1,582	1,570

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.3.*****Valores inconsistentes para las muestras de 210 kg/cm<sup>2</sup>***

Día	Valor con análisis estadístico	Valor sin análisis estadístico	Variación porcentual de la estimación
2	-72,33	-52,50	37,77
3	-162,59	-126,94	28,08
9	-325,56	-354,17	8,07
10	-450,67	-418,06	7,80
11	-395,00	-400,00	1,25
22	-485,00	-488,89	0,80

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 5.4.*****Valores inconsistentes para las muestras de 250 kg/cm<sup>2</sup>***

Día	Valor con análisis estadístico	Valor sin análisis estadístico	Variación porcentual de la estimación
14	-433,33	-478,89	9,51
15	-450,83	-489,17	7,83
23	-520,83	-562,78	7,45

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 5.3 hubiera habido una variación porcentual que rondaban entre 0,80% a un 37,77%; caso contrario en la tabla 5.4. se observa que habría un error que estaría entre 7,45% y 9,51%.

- Se puede concluir que cuanto mayor sea el número de mediciones que se realiza a una muestra se puede tener mayor precisión en los valores de la retracción, así como se puede observar la tabla 2.18. a mayor número de mediciones se obtendrán resultados más cercanos a los reales, pues el límite de “k” que separa a los valores consistentes de los inconsistentes es más riguroso, por lo cual al realizar 10 mediciones en cada una de las muestras se obtiene valores más exactos y precisos de la retracción por secado, en la tabla 5.5. se puede ver cuál habría sido la consecuencia de realizar menos mediciones y menos muestras de hormigón.

**Tabla 5.5.**

*Variación del valor de “k” según el número de mediciones*

Número de muestras “p”	Número de mediciones “n”	
	3	10
12	2,14	1,57

Fuente: “Práctica estándar para determinar la precisión de un método de ensayo” tomado de ASTM E691-05

De la tabla anterior se observa que si se hubiera realizado menos mediciones se tendría mayor tolerancia en el valor límite de “k” lo cual daría como resultado que las mediciones de la retracción se alejarían de los valores reales. De lo analizado anteriormente se concluye que un número de mediciones de 10 es el más adecuado para obtener resultados satisfactorios.

- Se puede concluir que cuanto mayor sea la resistencia que se requiere la retracción será mayor, esto depende de los factores de la mezcla como se ve en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6.**

*Factores de mezcla de los hormigones de 210 y 250 kg/cm<sup>2</sup>*

Factores	210 kg/cm <sup>2</sup>	250 kg/cm <sup>2</sup>
Contenido de agregado (%)	65,7	64,4%
Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	368,04	409,18
Contenido de agua (kg/cm <sup>3</sup> )	184,01	185,12

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 5.6. se puede observar que cuando se requiera mayores resistencias se va requerir mayor cantidad de cemento y agua, y habrá una reducción del porcentaje de

agregados, lo cual de acuerdo a la teoría indica que cuanto mayor sea la cantidad de cemento y menos sea el contenido de agregado daría como resultados más retracción.

- Durante el fenómeno de la retracción ocurren cambios de longitud (deformaciones) que no solo son de encogimiento, sino que también se llegan a desarrollar expansiones del mismo, así como se observó en los hormigones de 210kg/cm<sup>2</sup>, pero cuando se analizó los hormigones de 250 kg/cm<sup>2</sup> se observó que su deformación era un proceso continuo de encogimiento.

De lo descrito anterior se puede concluir que la disminución de la longitud es la que más predomina a lo largo del tiempo de secado del hormigón.

- Analizando las muestras de resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup> este hormigón pierde al final de los veinte ocho días 0,149 kg, de agua de este total de más de la mitad del agua se llega a perder durante los primeros siete días y después de este la pérdida de agua se va dando de manera más lenta.

Las muestras de 250 Kg/cm<sup>2</sup> esta llega a perder al final de los veintiocho días un total de 0,181 kg de agua y que más de la mitad del agua se llegó a perder hasta el día trece de ahí en adelante la pérdida de agua es más lenta.

De lo descrito anteriormente se puede concluir que cuanto mayor sea la resistencia a compresión la perdida de agua se prolongará más tiempo y por ende perderá más agua.

- Poder establecer una especificación técnica puede facilitar el desarrollo del estudio de la retracción, pues este ayudara a reducir los errores que se presenten durante las mediciones y poder obtener resultados más confiables, y de esta manera poderlo aplicar para analizar otros factores que no hayan sido estudiados en el presenta estudio.
- Se puede concluir que no todos los modelos de estimación dan valores cercanos a los medidos en laboratorio, lo cual llega a generar incertidumbre al momento de su aplicación. En este estudio se pudo apreciar que la mayor parte de los modelos subestiman la retracción, de los cuatro modelos estudiados el GL 2000 es el modelo que menor variación de retracción presenta con respecto a las mediciones de laboratorio siendo la máxima variación de 17,71% y 22,49% para las muestras de

resistencias de 210 kg/cm<sup>2</sup> y de 250 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, por lo cual este modelo es el que mejor se adecúa para estimar la retracción en la ciudad de Tarija.

## **5.2.Recomendaciones**

- Se recomienda realizar las mediciones de la retracción de manera cuidadosa, debido a que el equipo de medición es muy sensible al movimiento y una mala manipulación de ella puede dar como resultado valores erróneos.
- Se recomienda que para futuras investigación seleccionar distintos bancos de agregados estudiando su propiedades físicas y mecánicas y analizar cómo influye en la retracción por secado.
- Si bien para el presente estudio se estudió a retracción para un tiempo de curado de un día de acuerdo al ensayo ASTM C 157, se recomienda tomar esta variable como objeto de estudio y poder ver cómo afecta en la retracción por secado.
- Si bien el mejor modelo de estimación para la retracción por secado fue el modelo GL 2000, se debe considerar que para este modelo se usó las condiciones ambientales de la ciudad de Tarija provincia Cercado, por lo cual si se consideran otras condiciones de diferentes ubicaciones geográficas este modelo podría no ser el mejor por lo cual se recomienda seguir estudiando la retracción para dichas variables.
- Si bien las mediciones de la retracción de este estudio fueron para el cemento tipo IP-30 de Fancesa se recomienda observar la variación de la misma con otros tipos de cemento y otras marcas.