

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

## **1.1.- Antecedentes históricos**

Al momento de diseñar edificios, puentes y otras estructuras, es importante considerar la reología del hormigón para que dichas estructuras puedan desempeñarse para el fin con el que fueron concebidas y no presenten problemas de fisuración y deformación a lo largo del tiempo. Al analizar la reología como una rama de la mecánica, se pretende determinar las deformaciones a lo largo del tiempo que se producen en el hormigón. Según García, Moran y Arroyo (2009) las dos características más importantes de la reología del hormigón son la retracción y fluencia.

La retracción es también definida como un fenómeno, el cual es muy importante estimarlo de forma realista, ya que es un aspecto relevante para la evaluación de estructuras de hormigón a fin de garantizar su durabilidad y condiciones de servicio a lo largo del tiempo.

El profesor Bazant es una de las personas que realizó significativos aportes a lo largo de su vida con referencia a la retracción, siendo así que en el año 1987 efectuó mediciones en laboratorio de la variabilidad de la contracción en el hormigón y estableció que, para especímenes realizados con una misma mezcla, la variación de retracción entre ellos es de 8%.

A medida que pasó el tiempo hasta la actualidad se establece un gran desarrollo, desde la variabilidad de la tecnología para la medición de los ensayos, geometría de los moldes usados, la dosificación, composición del hormigón y cementos utilizados.

Por tales motivos en la actualidad contamos con tres bases de ensayos de retracción realizadas por el profesor Bazant, RILEM y JSCE. Estas bases de ensayos tienen la finalidad de unificar los criterios con las que fueron realizadas y separarlas en intervalos de tiempo que se seguirán ampliando con los ensayos que se sigan realizando en los siguientes años, de esta manera se puede ejecutar su respectivo análisis de datos de acuerdo a las características con las que fueron estudiados en sus respectivos intervalos de tiempo.

En la actualidad empleando al American Concrete Institute ACI (2008) recomienda realizar pruebas a corto plazo para determinar la retracción del hormigón y mejorar las predicciones de su deformación a largo plazo. Así también, sugiere que las correlaciones solo se deben hacer con investigaciones recientes y relevantes de retracción, por lo tanto, se proseguirá con los parámetros de forma del hormigón utilizados por Belenguer (2015)

## **1.2.- Planteamiento del problema**

En el transcurso del tiempo se estudió a la retracción como un fenómeno, el cual genera deformaciones impuestas de carácter irreversible en el hormigón, lo cual produce fisuraciones que comprometen la durabilidad y el futuro comportamiento de la estructura. Al generarse estas fisuras pueden permitir el ingreso de agentes nocivos al interior, siendo directamente afectado el acero.

Por el concepto anteriormente mencionado es que distintos países a través de sus centros de investigación desarrollaron diversos modelos de predicción para la deformación a causa de la retracción, estos fueron adaptados para las condiciones de su entorno a través de un estudio de los factores que afectan de forma directa a este fenómeno, los factores son: *humedad relativa, temperatura, tipo de cemento usado, la presencia de finos en los agregados y cantidad de agua de amasado.*

(American Concrete Institute ACI, 2008) Establece que las descripciones de cemento difieren de país en país. Los datos obtenidos de los hormigones elaborados con cemento europeo no pueden ser comparados directamente con datos obtenidos de hormigones elaborado con cemento de Estados Unidos. El motivo es que las curvas generadas por la retracción varían en hormigones realizados en el Pacífico Sur de Europa, Japón, América del Norte por las condiciones locales. La investigación ha demostrado que las mediciones de retracción a corto plazo mejoran las predicciones independientes de la ubicación.

Asimilado el concepto anterior, el fenómeno de retracción es sensible al tipo de cemento usado, por lo tanto, cada país o lugar es responsable de su correcta aplicación a las condiciones de su entorno. En la siguiente figura se identifica las variaciones de óxidos que contiene algunos tipos de cementos de los cuales si se estudió su respectiva retracción en relación con el cemento El Puente.

**Tabla 1.1. Porcentaje de óxidos que componen el cemento portland**

Óxidos	% en la composición	
	Limite Superior	Límite Inferior
CaO	67	60
SiO <sub>2</sub>	25	17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	3
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.5
MgO	5.5	0.1
SO <sub>3</sub>	3	1

Fuente: Soroka, 1979

**Tabla 1.2. Porcentaje de óxidos que componen el cemento portland**

Óxidos	% en la composición
CaO	62.5
SiO <sub>2</sub>	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.5
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5
MgO	2
SO <sub>3</sub>	2

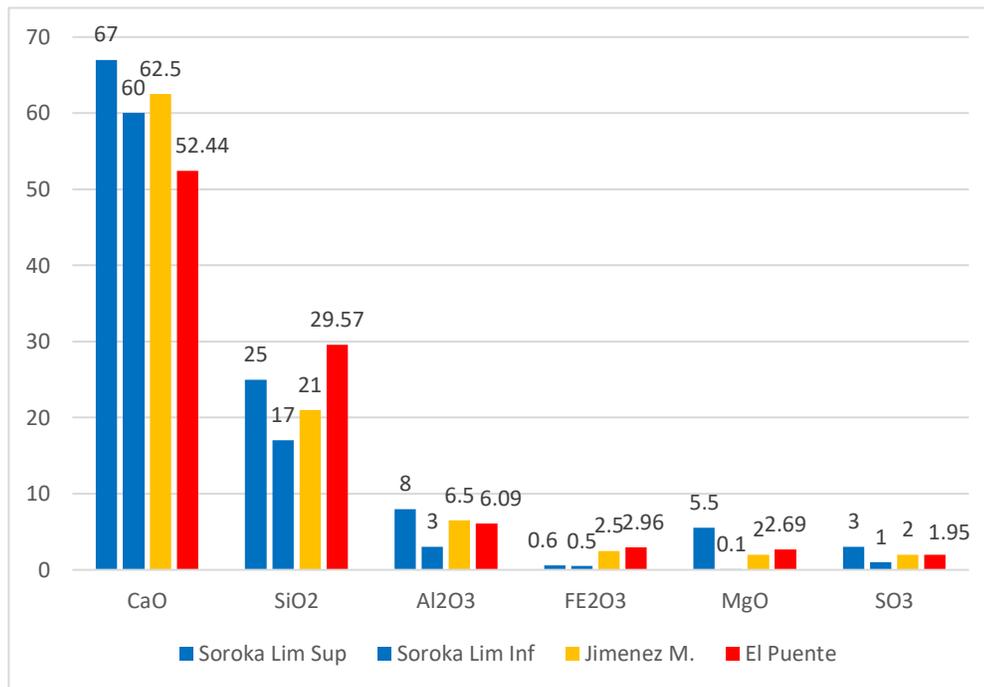
Fuente: García et al., 2009

**Tabla 1.3. Contenido porcentual de óxidos del cemento El Puente**

Código			Cemento El Puente
Fecha	dic-20		
Tipo	IP-30		
Especificaciones químicas	PPF	%	4.39
	SiO <sub>2</sub>	%	29.57
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6.09
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2.96
	CaO	%	52.44
	MgO	%	2.69
	SO <sub>3</sub>	%	1.95
	R.I.	%	16.27
	Cal libre	%	1.34

Fuente: Informe de control de calidad de cemento El Puente, diciembre del 2020

**Figura 1.1. Análisis de contenido de óxidos de los cementos**



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 1.1, el cemento El Puente tiene en su constitución diferente porcentaje de Oxido de Calcio (Ca O) de acuerdo a los tipos de cementos que ya fueron analizados por autores como el Profesor Soroka, Jiménez Montoya y Neville. Lo propio ocurre con el Dióxido de silicio (Si O<sub>2</sub>) y el Trióxido de dihierro (Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>). De tal manera se comprueba el comentario de (American Concrete Institute ACI, 2008) donde menciona que las descripciones de cemento difieren de país en país.

Otro punto muy importante lo menciona Basf (2009) donde comenta que la presencia de arcillas en el agregado aumenta la retracción, el recubrimiento de arcilla en el agregado puede aumentar un 20% de retracción. Fernández Cánovas (2007) también se pronuncia sobre la contaminación de áridos con arcillas y comenta que esta contaminación de áridos da lugar a que aumente la retracción provocando incrementos que a veces pueden llegar a un 70%, de modo que disminuyen el poder frenante de retracción que los áridos normalmente llegan a producir.

Fernández Cánovas (2007) da a conocer que la presencia de arcillas en la arena es nefasta, debido a que contribuye a reducir la resistencia por falta de adherencia. La adherencia entre cemento y árido es muy afectada ya que esta depende del estado superficial del árido, mientras más rugosa es la superficie, mayor adherencia proporciona.

Dado que la ciudad de Tarija está emplazada sobre estratos de suelo que en su gran porcentaje son arcillosos, es coherente asimilar que los áridos también cuentan con cierto porcentaje de arcillas. Así mismo, el cemento El Puente contiene porcentajes de óxidos que difieren de los rangos de otros tipos de cementos que ya fueron analizados. Por tales motivos planteados es que se cuestiona la aplicación directa de modelos predictivos de retracción sin antes realizar pruebas experimentales con los tipos de materiales que contamos en nuestro medio y condiciones ambientales respectivas.

Es así que en el presente trabajo de investigación se determinará la retracción por secado en el hormigón usando cemento El Puente en las condiciones ambientales de la ciudad de Tarija ya que este es un fenómeno que afecta y limita la vida útil del hormigón.

### **1.3.- Formulación de hipótesis**

Los modelos de estimación de retracción GL2000, MC90-99 y B3 Bazant consiguen resultados de hasta el 15% más efectivos que el modelo recomendado por la norma ACI 209.2R, puesto que tienen modificaciones y evidencia científica más recientes.

#### 1.4.- Justificación del estudio

Para establecer la resistencia y capacidad de servicio de estructuras de hormigón armado y hormigón preesforzado, el ingeniero estructural requiere una descripción apropiada de las propiedades mecánicas de los materiales, incluyendo la prevención de la deformación dependiente del tiempo del hormigón endurecido. Entre estos tipos de deformación tenemos a la retracción que es importante para evaluar el riesgo de fisuración del hormigón. (American Concrete Institute ACI, 2008)

Siendo así que el ingeniero estructural en nuestro medio al diseñar y calcular estructuras utilizando hormigón preesforzado debe de *estimar las pérdidas que se generarán*, estas pueden ser instantáneas o diferidas.

En el concepto anterior, es importante resaltar la frase de *estimar las pérdidas*, la cual es correctamente usada, ya que especialistas estructurales de nuestro entorno tienen la idea clara de que se utilizan ecuaciones para el cálculo de la deformación por retracción que otorgan resultados buenos pero se pueden optimizar realizando ensayos experimentales, puesto que dichas ecuaciones no fueron analizadas, ni estudiadas con la humedad relativa que presenta la ciudad de Tarija, tipo de cemento y materiales de los cuales se dispone.

Si no se realizan ensayos físicos específicos de retracción y no se cuenta con experiencia previa con los materiales que se han de utilizar, no se puede esperar que los métodos empíricos a los cuales se hacen referencia permitan obtener resultados con errores menores que  $\pm 50$  por ciento. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004)

Dado que la principal aplicación de la deformación por retracción es en el hormigón preesforzado, el ingeniero estructural podrá contar con valores reales de este tipo de deformación, y de igual manera, el modelo de estimación que otorgue resultados con menor error respecto de los valores reales para las condiciones de entorno de la ciudad de Tarija y cemento El Puente.

El análisis en hormigón elaborado con cemento El Puente es puesto en experimentación por dos puntos: El primero, es que es uno de los más comerciables dentro de la ciudad

y el segundo, en contacto con SOBOCE mencionan que en los laboratorios de la ciudad de Tarija no se realiza ningún tipo de ensayo referente a la retracción del cemento El Puente, es más, comenta que en ningún laboratorio de Bolivia perteneciente a SOBOCE se realizan este tipo de ensayos, por lo que se establece que el fenómeno de retracción no está estudiado.

En efecto a que la fábrica de cemento SOBOCE no realiza ensayos referentes a la retracción en el cemento El Puente y la necesidad de optimizar los resultados de este tipo de deformación, surge el presente trabajo de investigación que tiene la finalidad de cuantificar la deformación por retracción de secado e identificar el modelo predictivo más eficiente para la ciudad de Tarija.

## **1.5.- Objetivo**

### **1.5.1.- Objetivo general**

Determinar la retracción por secado en el hormigón utilizando cemento El Puente en la ciudad de Tarija, para así cuantificar este tipo de deformación y compararlo con los modelos predictivos de retracción que nos presenta la norma ACI código 209.2R-08.

### **1.5.2.- Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización de los agregados pétreos provenientes de Santa Ana y del cemento El Puente.
- Realizar la dosificación del hormigón para una resistencia mecánica a compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup>.
- Determinar la resistencia mecánica a compresión en los cilindros de hormigón de sección estándar (150 mm de diámetro por 300 mm de altura)
- Medir la retracción por secado en el hormigón durante un periodo de 28 días.
- Establecer el diagrama de la deformación de retracción de secado en comparación al tiempo.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos en mediciones directas de la deformación real por retracción de secado en comparación con los estimados

usando modelos predictivos de la norma ACI código 209.2R-08, en los días 7, 14 y 28.

## **1.6.- Metodología de la investigación**

### **1.6.1.- Tipo y enfoque de la investigación**

El presente trabajo de investigación es elaborado bajo un planteamiento metodológico de enfoque cuantitativo puesto que se medirá al fenómeno de retracción de acuerdo a la realidad en la que se presenta.

### **1.6.2.- Descripción de equipos e instrumentos**

#### **a) Para la caracterización de los agregados**

- **Cuarteador mecánico.-** Sirve para reducir el material al necesario para realizar el ensayo, el cual nos permite obtener una muestra representativa de los agregados.
- **Balanza.-** La cual debe de tener una capacidad superior a la masa de la muestra más el recipiente de pesaje y contar con una precisión de 0.1 g.
- **Serie de Tamices.-** Son constituidos por tejidos de alambre, marcos lo suficientemente rígidos para fijar, ajustar los tejidos de alambre y estos cuentan con abertura cuadrada.

La serie de tamices normada y utilizada son los siguientes: 2” , 1 ½” , 1” , ¾” , ½” , 3/8” , N°4 , N°8 , N°16 , N°30° , N°50 , N°100, tapa y base.

- **Horno eléctrico.-** Es utilizado para el secado de los materiales que se usa en los distintos ensayos que así lo soliciten, el cual debe de contar con una temperatura de 100 a 110°C.
- **Tamizador eléctrico.-** El cual se ocupa para un primer tamizado con una duración de 10 minutos y posteriormente se realiza un segundo tamizado manual.

- **Herramientas y accesorios.-** Se usan para completar distintas operaciones, tales como limpieza y preparación de materiales, entre ellos se tiene: Espátulas, brochas, cepillo de acero, recipientes para el secado y recipientes para el pesaje.

**b) Para la caracterización del cemento**

- **Balanza.-** La cual debe de tener una capacidad superior a la masa de la muestra más el recipiente de pesaje y contar con una precisión de 0.1 g.
- **Tamices.-** Para la determinación de la finura del cemento El Puente se usa los siguientes tamices: N°50 , N°200, tapa y base.
- **Herramientas y accesorios.-** Se usan para completar distintas operaciones, tales como limpieza y preparación de material, entre ellos se tiene: Espátulas, brochas, cepillo de acero, recipientes para el pesaje.

**c) Para la dosificación y elaboración de probetas cilíndricas**

- **Cono de Abrams.-** Este sirve para evaluar el revenimiento de mezclas de hormigón y así verificarlo con el revenimiento de dosificación.
- **Moldes cilíndricos.-** En estos moldes se vierte la mezcla de hormigón, los cuales presentan las siguientes dimensiones: 150 mm de diámetro y 300 mm de alto.
- **Herramientas.-** Se usan para culminar tareas de compactación y eliminación de vacíos, tales como: Martillo de goma y varilla pisón,

**d) Para los ensayos de resistencia mecánica a compresión**

- **Prensa.-** Mediante la utilización de la prensa se determina la resistencia a compresión de las probetas a edades de: 3 , 7 y 28 días.

**e) Para la medición de retracción por secado**

- **Deformímetro.-** Dispositivo para medir las variaciones de longitud, el cual está comprendido por un comparador eléctrico para una longitud estándar de 300 mm y a partir de esta longitud, medir las variaciones o deformaciones que se presenten.

### 1.6.3.- Métodos y técnicas de investigación

La investigación se realiza bajo los siguientes métodos:

- Método empírico, mediante las mediciones realizadas en el laboratorio
- Método científico, en el análisis y procesamiento de resultados

### 1.6.4.- Selección de variables

#### Variables independientes

Tabla 1.4. Variables independientes de los modelos predictivos de retracción

Variables	ACI	B3	GL2000	MC90
t (edad del hormigón)	X	X	X	X
$t_s=t_o$ (edad de inicio de la retracción)	X	X	X	X
$A_c=s$ (área de la sección transversal)	X	X	X	X
v (volumen de la pieza)	X	X	X	
u (perímetro en contacto con la atmosfera)				X
$f_{ck}(28)$ (resistencia característica a 28 días)		X	X	X
$E(28)$ (módulo de deformación a 28 días)		X		
Tipo de cemento		X	X	X
Contenido de cemento	X			
Contenido de árido fino	X			
Contenido de agua		X		
Consistencia	X			
Contenido de aire	X			
Tipo de curado	X	X		
Periodo de curado	X			
Humedad relativa	X	X	X	X

Fuente: Belenguer (2015)

En la tabla 1.4 se puede observar que los modelos predictivos son dependientes de un gran abanico de variables, pero entre las más influyentes se tiene:

- **Humedad Relativa:** El fenómeno de la retracción por secado se experimenta cuando la humedad relativa del ambiente es menor que la que existen en los poros del sólido. (Perepérez, Barberá,2005).
- **Tipo de cemento usado:** Se comportan de forma diferente el cemento de endurecimiento rápido, normal o lento.

- **Cantidad de áridos en el hormigón:** La cantidad de áridos en el hormigón es decisiva ya que estos son los que presenta el poder frenante de la retracción dentro de su constitución. (Fernández Cánovas, 2007)
- **Cantidad de agua de amasado:** El volumen de agua que se presenta en el hormigón es un punto muy importante a analizar, ya que reduce el volumen de áridos que tendrá por constitución el hormigón y ellos son los que realmente frenan la retracción, por tal motivo, conociéndose la cantidad de agua de amasado se puede llegar a tener una idea del orden de la magnitud de la retracción que puede presentar el hormigón. (Fernández Cánovas, 2007)

### **Variables dependientes**

- **Retracción por secado:** Es un tipo de deformación impuesta de carácter irreversible que se presenta en el hormigón el compromete la durabilidad y futuro comportamiento de la estructura.

#### **1.6.5.- Tamaño de la muestra**

Fue elegido en base a la normativa ASTM que para el ensayo de retracción por secado indica que puede constar de 4 probetas, pero es preferible analizar 12 probetas, por lo cual *el tamaño de la muestra a usar es de 12 probetas.*

Para la determinación de la resistencia a compresión se analiza 9 probetas, con rotura de 3 probetas a los 3, 7 y 28 días.

Por lo tanto, el total de probetas realizadas en este estudio es de 21.

**CAPÍTULO II**  
**MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se pretende exponer de forma clara todos los conceptos vinculados con la retracción, así también identificar los factores que inciden en este fenómeno de estudio. Por este motivo, se realizará una breve introducción de los componentes del hormigón para posteriormente definir la retracción. Cabe mencionar que existen diferentes tipos de retracción que se mencionaran más adelante, los cuales son procesos ocasionados por distintas causas.

Conforme evoluciona el hormigón, este ha ido recibiendo distintas definiciones, unas más técnicas que otras, por lo cual, en este trabajo de investigación lo identificaremos como lo menciona la Federación Internacional de Hormigón Estructural (fib - Fédération internationale du béton) Material elaborado en base a la mezcla de cemento, agregados pétreos y agua, producido por la hidratación de la pasta de cemento (cemento – agua): además de estos componentes, el hormigón puede contener aditivos y/o adiciones. Para que una mezcla sea considerada hormigón, el tamaño máximo del agregado pétreo debe de ser mayor a 4 mm, caso contrario se lo denomina mortero (CEB-FIP,1990)

Para poder entender el comportamiento del hormigón se debe estudiar distintas variables debido a que este no tiene un comportamiento completamente elástico, sino que a juicio de García, Moran y Arroyo (2009) se ha definido que el hormigón presenta una compleja reología, en la cual participan las características de estos tres tipos de estados: Los elásticos, los viscosos y los plásticos. Para asimilar el concepto anterior se debe de recordar que en el hormigón coexisten la fase sólida (áridos y cemento), la líquida (agua) y la gaseosa (aire ocluido).

Por el planteamiento ya mencionado, se decide de manera imprescindible hacer referencia a los componentes del hormigón antes de adentrarse a un análisis más detallado de la retracción y de los modelos predictivos de estimación.

## 2.1.- Componentes del hormigón

### 2.1.1.- Cemento

Es un conglomerante hidráulico que en contacto con el agua tiene la capacidad de fraguar y endurecen tanto expuesto al aire como sumergidos en agua.

El principal componente de los cementos utilizados en el hormigón es el Clinker portland, el cual se obtienen al calcinar calizas y arcillas hasta obtener una mezcla total de sus componentes. (García et al. ,2009)

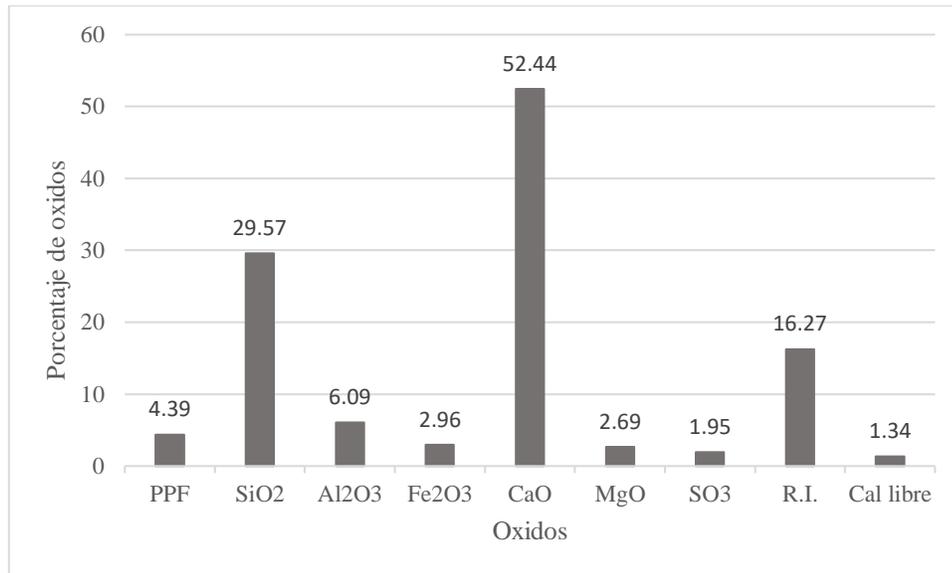
En la siguiente tabla extraída de la ficha de control de calidad del tipo de cemento en estudio denominado cemento El Puente se mostrará los porcentajes de óxidos que contiene.

**Tabla 2.1. Contenido porcentual de oxido del cemento El Puente**

Código Fecha Tipo	Diciembre 2020 IP-30	Cemento El Puente
Especificaciones químicas	PPF	% 4.39
	SiO <sub>2</sub>	% 29.57
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 6.09
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 2.96
	CaO	% 52.44
	MgO	% 2.69
	SO <sub>3</sub>	% 1.95
	R.I.	% 16.27
	Cal libre	% 1.34

Fuente: Informe de control de calidad de cemento El Puente, diciembre del 2020

**Figura 2.1 Análisis de los componentes del cemento El Puente**



Fuente: Elaboración propia

Las principales reacciones químicas que se presentan en el clínker portland son las siguientes: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato bicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y aluminoferrito tetracálcico ( $C_4AF$ ). (Perepérez, Barberá, 2005)

De acuerdo a García et al. (2009) se menciona brevemente los cuatro componentes citados.

#### a) Silicato tricálcico

Es una de las reacciones químicas más importantes del clínker, debido a que puede desarrollar resistencias elevadas a edades tempranas, lo que provoca que presente un elevado calor de hidratación. Esta reacción proporciona un endurecimiento rápido y fraguado lento, por tal motivo es que se presenta en óptimas proporciones en cementos que necesiten endurecimiento rápido y altas resistencias iniciales. Se debe tener cuidado con el contenido de esta reacción en cementos que se lleguen a usar en obras de gran envergadura donde el hormigón en masa sea solicitado en grandes cantidades, no debiendo pasar un 35% del contenido de esta reacción en el cemento para evitar un

elevado calor de hidratación, en estos casos es preferible usar mayores proporciones de silicatos bicálcico que silicatos tricálcicos.

#### b) Silicato bicálcico

Es la reacción que otorga al cemento su resistencia a largo plazo, gracias a esta reacción se presentan fraguados y endurecimientos lentos. También tiene el calor de hidratación más bajo de las cuatro reacciones principales del cemento. Por estas características presentadas en cementos donde contenga altos contenidos de silicato bicálcico se beneficiará en agentes protectores a los sulfatos.

#### c) Aluminato tricálcico

Esta reacción provoca calores de hidratación y fraguados muy elevados al igual que una retracción más rápida, siendo esta una de las reacciones que manda en las resistencias a corto plazo. También tiene buena resistencia a aguas agresivas de mar, pero no así de los sulfatos.

#### d) Aluminoferrito tetracálcico

Es una reacción que no aporta a la resistencia mecánica y su presencia se debe a la cantidad de hierro en la fabricación del clínker. En cuanto al calor de hidratación se puede decir que es baja y presenta una gran velocidad de fraguado.

### **2.1.2.- Agua**

Este componente es uno de los más indispensables a la hora de la elaboración del hormigón, de acuerdo con Belenguer (2015) este se debe de analizar a partir de tres puntos de vista tales como: Agua de amasado, el agua de curado y para concluir el agua que se encuentra dentro del hormigón.

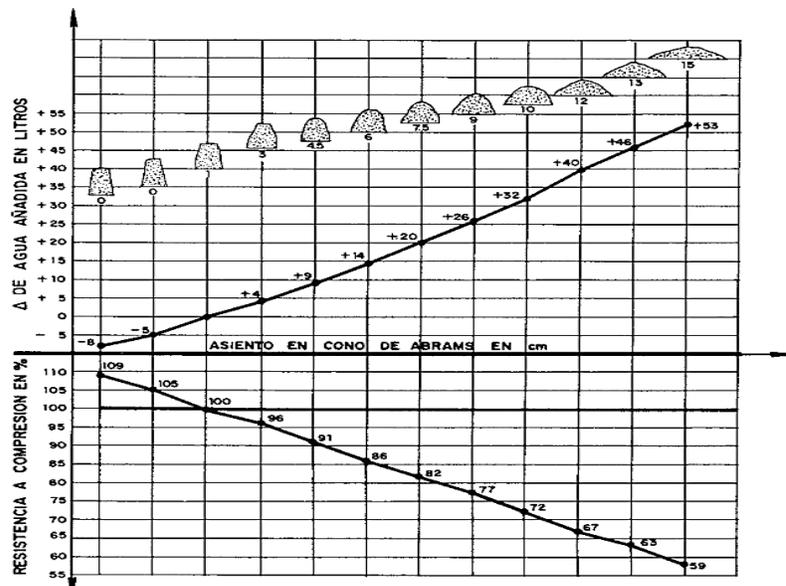
### 2.1.2.1.- Agua de amasado

Citando a García et al. (2009) el agua de amasado tiene dos funciones principales en la elaboración del hormigón. Una de ellas es que produce las reacciones para la hidratación del cemento y la otra es otorga una trabajabilidad óptima para que el hormigón pueda ser usado en obra.

El agua de amasado debe estar sujeto a valores mínimos recomendados y cantidades necesarias ya que de llegar a proporcionar un exceso de agua, esta se evaporará y en consecuencia de esto dará paso a crearse una serie de huecos en el hormigón (capilares), se debe también tomar en cuenta de no trabajar con cantidades de agua menores a la de los mínimos recomendados ya que producen masas poco trabajables y de difícil puesta en obra.

En la figura 2.2 se pretende exponer la influencia del agua en el hormigón, en la parte superior se indica como mejora la trabajabilidad de la masa al aumentar la cantidad de agua por  $m^3$  de hormigón, mientras que en la parte inferior puede apreciarse el porcentaje de pérdida de resistencia del hormigón correspondiente.

Figura 2.2. Influencia del agua en la resistencia del hormigón



Fuente: García et al. (2009)

Puede retenerse la idea de que cada litro de agua de amasado añadido de más a un m<sup>3</sup> de hormigón, equivale a efectos resistentes a robar dos kilogramos de cemento a dicho metro cúbico. Por otra parte, el agua de amasado debe cumplir ciertas características como estar limpia y libre de impurezas, ya que de no ser así, se provocara que la hidratación del cemento no reaccione de la forma en la cual fue proyectada. (Neville,2007)

#### **2.1.2.2.- Agua de curado**

El agua de curado, tiene por objeto de evitar que el hormigón se deseque durante su fraguado y primer endurecimiento de la mezcla. También mejora la hidratación del cemento e impide su retracción prematura. (García et al. ,2009)

Las aguas que son aptas para el amasado también son consideradas aptas para curado, con la diferencia que las sustancias nocivas en el amasado no afectan en el curado, debido a que los curados en muchas ocasiones son relativamente cortos, en curados que sean realizados por inmersión o prolongados se debe de estudiar las sustancias nocivas presentadas. (Fernández Cánovas, 2007)

#### **2.1.2.3.- Agua en la pasta de cemento endurecida**

En la pasta endurecida existe un volumen de agua retenida con distintos grados de firmeza, que de mayor a menor grado se clasifican en:

a) Agua combinada químicamente

Es un tipo de agua que no se pierde bajo ningún gradiente de humedad relativa y es derivado de la hidratación del cemento

b) Agua interlaminar

Es una capa de agua molecular en forma de láminas también denominado zeolita y que puede llegar a perderse cuando la humedad relativa es menor al 11%

c) Agua físicamente absorbida

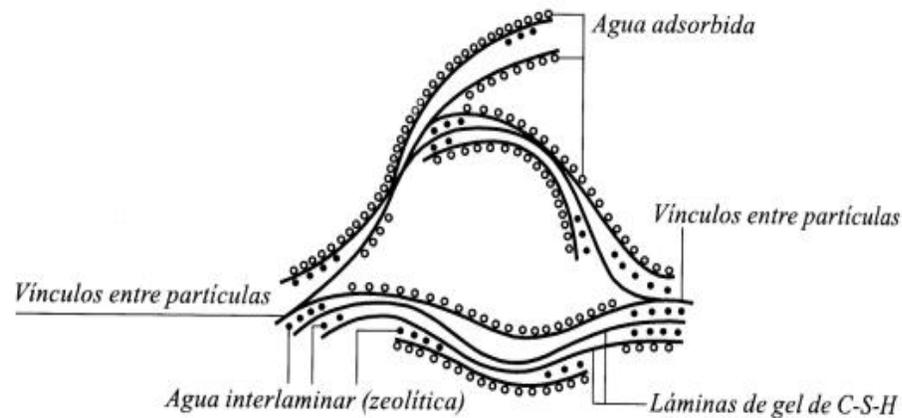
También se la denomina como agua de gel, es el agua que absorbe los sólidos con relación a sus condiciones superficiales. Esta se pierde cuando la humedad relativa alcanza los 30%

d) Agua libre

Este tipo de agua es la que ocupa los poros capilares. La cantidad de agua libre estará en función al tamaño de los poros que se presenten en el sólido.

Por ello es más adecuado llamarla agua capilar y es la única capaz de promover la hidratación del cemento. (Perepérez, Barberá, 2005)

**Figura 2.3. Estado del agua en la pasta de cemento**



Fuente: Perepérez, Barberá, 2005

### 2.1.3.- Áridos

Son materiales pétreos que pueden presentarse en forma machacada o no, naturales o artificiales, los cuales también presentan diversidad de tamaños y formas que deben de ser apropiadas para la elaboración del hormigón. (CEB-FIP, 1990) (ACI, comité 116) La presencia de áridos es aproximadamente el 70% de volumen de la mezcla en hormigones convencionales. (AFGC, 2002)

En sus inicios los áridos solo eran usados como materiales inertes contemplando la idea de poder lograr elementos más económicos, pero al pasar el tiempo y la experiencia adquirida determinaron que no solo son usados para dar mayor volumen al hormigón, sino que estos agregados son determinantes en las propiedades físicas, térmicas e incluso químicas.

Los áridos no solo limitan la resistencia del hormigón, si no que sus propiedades afectan de manera fundamental a la durabilidad de la estructura de hormigón. (Neville, 2007)

### **2.1.3.1.- Propiedades de los áridos**

#### **2.1.3.1.1.- Forma de las partículas**

Teniendo en cuenta a Mehta (2004), la forma de las partículas influye más en las propiedades del hormigón fresco, como en la docilidad, que en las del hormigón endurecido, así mismo lo afirma García et al. (2009), Los áridos pueden ser rodados o triturados. Los rodados proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo menos cantidad de agua que los triturados. Los agregados triturados proporcionan un cierto rigor que dificulta la puesta en obra en el hormigón fresco y en el hormigón endurecido proporciona mayores resistencias a tracción.

#### **2.1.3.1.2.- Tamaño máximo del árido**

Se denomina tamaño máximo de un árido a la mínima abertura de tamiz por el que pasa más del 90% en peso, debiendo a demás pasar la totalidad del árido por el tamiz de abertura doble.

Cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menor será la cantidad de cemento y agua del hormigón. El tamaño máximo del árido está limitado por la separación de las armaduras, medios de amasado y puesta en obra. (García et al. ,2009). Se define como árido fino o arena a la fracción del mismo que pasa por el tamiz N°4 de abertura 4.75 mm, siendo árido grueso la fracción del mismo que queda retenida en este tamiz. Las

arenas caben distinguir entre gruesa de tamaño 2 a 4.75 mm (Fernández Cánovas, 2007), la fracción comprendida entre el tamaño 2 a 0.075 mm se denomina arena fina y el restante de material menor a 0.075 mm son denominados como limos y arcillas.

A mayor tamaño máximo del árido, menor será la cantidad del agua empleada en el hormigón, por lo tanto, a igualdad de cemento habrá que esperar mayores resistencias. Esto es cierto para áridos de tamaño creciente hasta 40 mm, y a partir de este tamaño, a pesar de que disminuye la superficie específica, las resistencias no crecen, sino que experimentan una ligera reducción debido al descenso que se va produciendo en el área adherente y a las discontinuidades que introducen partículas muy grandes. (Fernández Cánovas, 2007)

### 2.1.3.1.3.- Granulometría de los áridos

La granulometría de los áridos por tamizado es el fraccionamiento del suelo integral en diferentes tamaños, este se obtiene en pesos retenidos para luego procesar en cálculos y obtener los porcentajes en peso de cada tamaño respectivamente.

En la Tabla 2.2. se muestra los tamices más idóneos para el uso de áridos en hormigones, junto a ellos su respectivo tamaño nominal.

**Tabla 2.2. Tamaño nominal de abertura de tamices**

Tamaño nominal de abertura	
mm	ASTM
50.000	2"
37.500	1 ½"
25.000	1"
19.000	¾"
12.500	½"
9.500	3/8"
4.750	N°4
2.000	N°10
0.425	N°40
0.075	N°200

Fuente: Sociedad americana para pruebas y materiales (ASTM)

La granulometría de los agregados finos de acuerdo con las normas ASTM C 33 (AASHTO M6), es generalmente satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los límites de estas normas, con respecto a la granulometría se expone en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Límites granulométricos del agregado fino**

Tamiz	Porcentaje que pasa	
9,50 mm	3/8"	100
4,75 mm	Nº4	95 a 100
2,36 mm	Nº8	80 a 100
1,18 mm	Nº16	50 a 85
600.00 µm	Nº30	25a 60
300.00 µm	Nº50	10 a 30
150.00 µm	Nº100	2 a 10

Fuente: Sociedad americana para pruebas y materiales (ASTM)

#### 2.1.3.1.3.1.- Módulo de finura

El módulo de finura es la determinación de la composición granulométrica de un árido. Para agregado fino, se puede definir como un índice de su valor en la mezcla. Este índice describe la proporción de finos y gruesos que se tienen en las partículas que los constituyen.

Algunos valores de módulo de finura se muestran en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4. Módulo de finura para arenas**

Tipo de arena	Módulo de finura
Arena gruesa	2.5 a 3.5
Arena fina	1.5 a 2.5
Arena muy fina	0.5 a 1.5

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del módulo de finura de la arena se utiliza la siguiente ecuación:

$$M_f = \frac{\Sigma \% \text{retenido}_{\text{acumulado}}(N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100} \quad (2.1)$$

## **2.2.- Reología del hormigón**

García et al. (2009) indican que la Reología es la rama de la Mecánica que estudia la evolución de deformaciones de un material, producidas por causas tensionales a lo largo del tiempo.

Las dos características reológicas más importantes del hormigón son la retracción y la fluencia. En este trabajo de investigación estudiaremos netamente la retracción.

### **2.2.1.- Retracción del hormigón**

García et al. (2009) mencionan que el fenómeno de retracción ocurre durante el proceso de fraguado y endurecimiento, el hormigón contrae de volumen cuando tal proceso se produce en el aire; y se entumece si se produce en el agua. El primer fenómeno se denomina retracción.

Wittman (1982) en concordancia con García et al. (2009) también menciona que la retracción es la deformación del hormigón en estado fresco o endurecido, e identifica que este fenómeno es producido por la pérdida de humedad, y que no depende de la carga externa aplicada.

La idea más importante que debe retenerse es que la retracción no es una fuerza, sino que es una deformación impuesta que ocurre por una pérdida paulatina del agua en el hormigón que así también provocará tensiones de tracción. En opinión de Neville (2007) expresa que dicha pérdida de agua es producida por la evaporación. En la práctica, la retracción se mide como una deformación lineal, si bien es una deformación volumétrica.

### 2.2.1.1.- Tipos de retracción

En la Tabla 2.5. se muestran los tipos de retracción existentes.

**Tabla 2.5. Tipos de retracción en el hormigón**

Tipos de retracción		
Fenómeno	Causa	Estado del hormigón
Retracción química	Reacción hidratación	Estado fresco
Retracción plástica	Secado superficial	Estado fresco
Retracción autógena	Hidratación	Estado endurecido
Retracción por secado	Secado pasta cemento	Estado endurecido

Fuente: Belenguer 2015

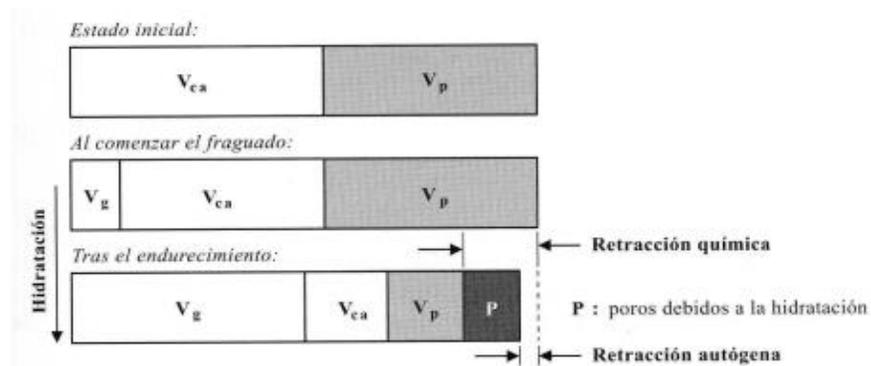
Cabe resaltar que en la presente investigación se abocara netamente a la retracción debida al secado.

#### 2.2.1.1.1.- Retracción química

Es la reducción de volumen debida a que la suma del volumen de agua y cemento es mayor a la del producto resultante tras la reacción. Puesto que la reducción de volumen no se produce libremente (debido a la presencia de áridos y armaduras) aparecen un volumen de poros debidos a la hidratación. (Perepérez, Barberá, 2005)

En la siguiente figura se ilustra la ocurrencia del fenómeno:

**Figura 2.4. Esquema retracción química y autógena**



Fuente: Perepérez, Barberá, 2005

En donde:

$V_{ca}$  = Volumen de cemento anhidro

$V_p$  = Agua que aún no ha reaccionado

$V_g$  = Volumen de gel de cemento

La hidratación del cemento va acompañada por la reducción de la fase sólida, pues la hidratación de los silicatos que constituye la parte esencial del cemento, da como consecuencia una reducción de volumen. (Aitcin, 1998)

De hecho, y muy esquemáticamente, para hidratar un volumen A de cemento, es necesario un volumen B de agua, que da como resultado un volumen C de pasta endurecida, y que siempre se cumple, a nivel de volumen que  $C < (A+B)$ . (Aitcin, 1998)

Si bien es cierto que no hay un consenso entre autores de acuerdo a los valores “A”, “B” y “C”, se acepta que la reducción de volumen es de aproximadamente 10%, tal y como lo demostró Le Chatelier hace más de cien años. (Aitcin, 1998)

#### **2.2.1.1.2.- Retracción plástica**

Uno de los profesores que estudio la retracción plástica dando una definición muy certera, fue el profesor Calavera que indica que este tipo de retracción ocurre en las primeras horas luego de realizar el hormigonado, provocada por una rápida evaporación del agua principalmente de la superficie que está en contacto con el ambiente.

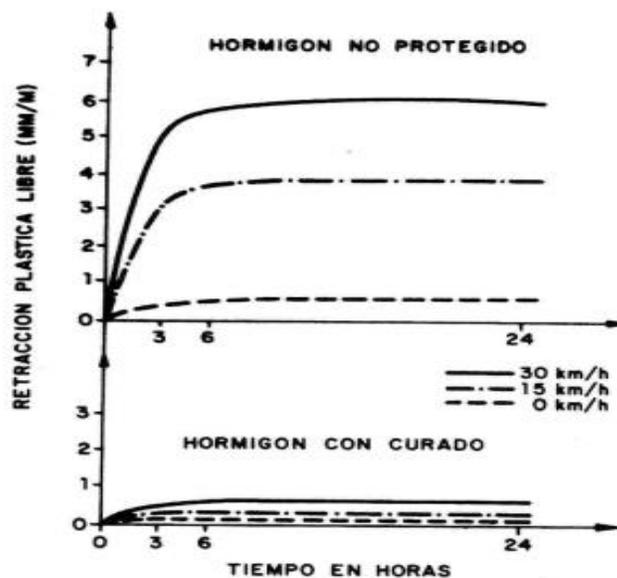
Neville (1999) Mientras mayor sea el agua evaporada, mayor será la retracción que se presente en el hormigón, la cantidad de agua evaporada depende principalmente de la temperatura del hormigón, velocidad del viento y humedad relativa del aire.

Es un fenómeno que se presenta principalmente en superficies planas como ser: losas, pavimentos, cubiertas, entre otros. Que, al estar en contacto con la naturaleza, el viento

puede provocar que el agua superficial se evapore de manera más rápida y en consecuencia va aumentando la retracción, más aún si la superficie no se encuentra protegida con agua o algún tipo de curado. (Fernández Cánovas, 2007)

Agranati (2008) también explica que la retracción plástica se refiere a la deformación del hormigón antes del fraguado final. La retracción plástica ocurre por la pérdida de agua del hormigón, por la evaporación del agua de la superficie y también por que en algunos casos donde no se da un buen impermeabilizado a los encofrados estos llegan a absorber agua de la constitución del hormigón. Cuando el hormigón aún está en estado fresco, todos los espacios libres en su constitución están llenos de agua. Este tipo de retracción se presenta con mayor frecuencia en pastas de cemento que en hormigones, esto a consecuencia de la presencia de áridos

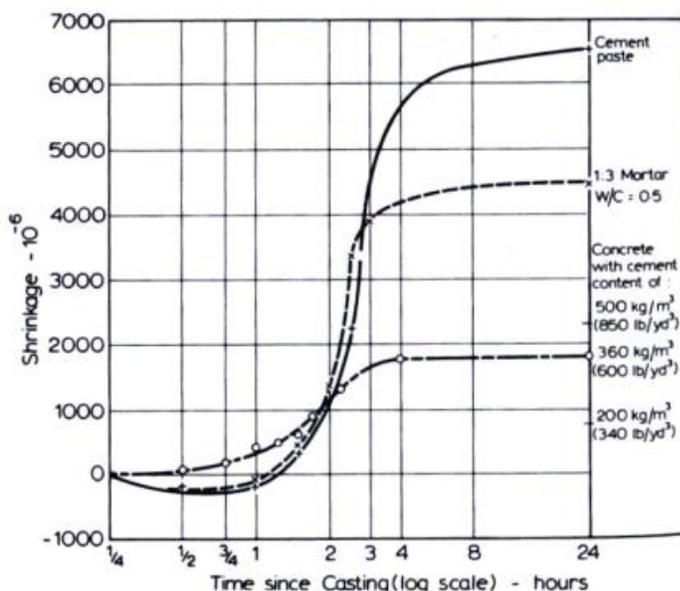
Figura 2.5. Retracción plástica con diferentes velocidades de viento



Fuente: Fernández Cánovas, 2007

En la Figura 2.6. se pueden ver valores típicos de la retracción plástica de la pasta, mortero y hormigón. La retracción en el hormigón es hasta tres veces más pequeña que la de la pasta, debido a los áridos.

**Figura 2.6. La retracción plástica en pastas, morteros y hormigones**



Fuente: Neville, 1995

Los factores relacionados con la mezcla que influyen sobre la retracción plástica son el contenido de cemento, la relación agua/cemento y el volumen de pasta. La retracción plástica aumenta con el aumento en contenido de cemento, pasta y al disminuir la relación agua/cemento.

Según algunas investigaciones (Turcry y Loukili, 2003) Los factores externos que agravan la retracción plástica son: humedad relativa baja, altas temperaturas y el viento. Se puede reducir y hasta eliminar la retracción plástica del hormigón con un curado adecuado y previniendo la evaporación de agua de la superficie.

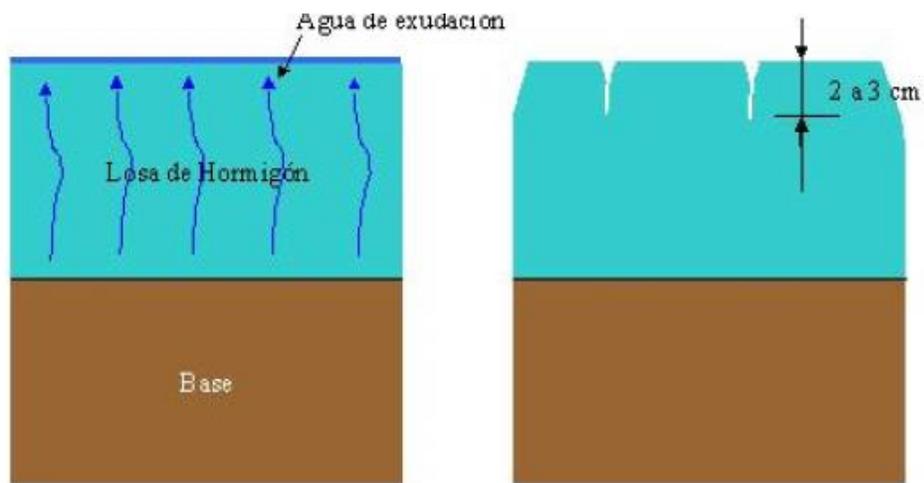
En las Figuras 2.7 y 2.8 se pretende mostrar el tipo de fisuración ocurrida por retracción plástica.

**Figura 2.7. Fisuración por retracción plástica**



Fuente: Munizaga, 2009

**Figura 2.8. Retracción superficial del hormigón**



Fuente: Munizaga, 2009

#### **2.2.1.1.3.- Retracción autógena**

Aquellos hormigones que tienen una baja relación agua cemento, dan como resultado que no dispongan de una buena cantidad de agua para completar el proceso de hidratación de las partículas de cemento. Ante ello, estos tipos de hormigones llegan a absorber el agua libre que se aloja en los poros capilares del hormigón para así poder completar el proceso de hidratación. Este fenómeno de consumo interno de agua, también llamado auto secado, es la causa de la retracción autógena del hormigón (Newman y Choo, 2003).

Perepérez, Barberá (2005) y Aitcin (1998) desarrollan un concepto más ilustrativo que comenta que en los sistemas sellados, es decir, sin aporte de agua exterior, los finos poros producidos por la retracción química, drenan agua desde los poros capilares de mayor tamaño. De este modo se genera una reducción de la humedad relativa en el interior que llamamos secado autógeno, y que aumenta la actividad del agua de los poros produciendo una disminución del volumen aparente llamada retracción autógena, que es bastante menor que la química.

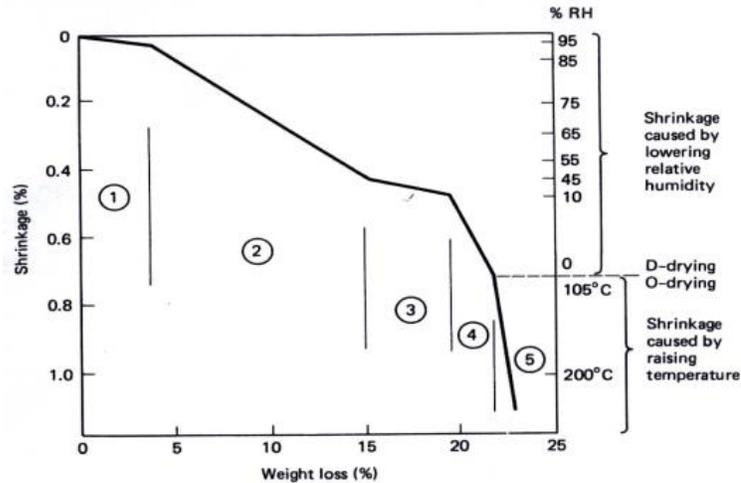
Ahora bien, debemos identificar la diferencia entre retracción química y la retracción autógena, esta se puede establecer según (Tazawa,1998) como en un marco temporal, es decir, la retracción química se da por concluida cuando el hormigón pasa de estado fresco a estado endurecido, mientras que la retracción autógena se inicia cuando el hormigón ya ha fraguado.

#### **2.2.1.1.4.- Retracción por secado**

La retracción de secado es una deformación relacionada con la pérdida de humedad del hormigón endurecido. Cuando existe un gradiente de humedad entre el hormigón y el ambiente, se pierde parte del agua que contiene la pasta. Este movimiento de agua hacia el exterior es la causa de la retracción.

En la Figura 2.9 se muestra como la retracción se desarrolla en función de la humedad relativa.

**Figura 2.9. Retracción y la perdida de humedad en pastas de cemento**



Fuente: Mindess y Young, 1981

En la figura mostrada se ve como la retracción aumenta con la disminución de la humedad. La disminución de la humedad relativa aumenta el gradiente de humedad entre la pasta y el ambiente, acelerando la pérdida de agua hacia el exterior.

El proceso de secado empieza con la pérdida de agua libre que se encuentra en los poros capilares (fase 1 y 2 en figura) En estas primeras fases, la retracción de la pasta aún no es visible, pero ya se forma un gradiente interno de humedad por el cual el agua adsorbida se desplaza hacia los poros. En caso que la humedad relativa baje del 45%, la pérdida de agua continúa y empieza a afectar al agua adsorbida a la superficie (fase 3). A continuación, se pierde el agua (fase 4), y por último tiene lugar la descomposición (fase 5).

### 2.2.1.2.- Factores que influyen en la retracción

Si bien diferentes autores indican que son numerosos los factores que afectan la magnitud y velocidad del desarrollo de la retracción. En este trabajo de investigación se los identificara en tres grupos: factores relacionados con la dosificación de la mezcla,

factores relacionados con el ambiente y factores relacionados con el método de ejecución.

#### **2.2.1.2.1.- Factores relacionados con la dosificación de la mezcla**

Entre los factores que influyen en la retracción al momento de realizar la dosificación del hormigón son los siguientes: contenido, tamaño y distribución de los áridos, el contenido de agua, tipo y cantidad de cemento, aditivo y adiciones.

**Contenido de áridos:** Una de las principales ventajas es que la cantidad de áridos puede limitar a que se produzcan significativas deformaciones debidas a la retracción. El hormigón está compuesto por el volumen de la pasta más el volumen de los áridos, de tal manera, si existe mayor cantidad de pasta tendremos menor volumen de áridos.

El contenido del árido influye en la retracción, pues mayor volumen de áridos por metro cubico, menor volumen de pasta existe, siendo de este modo menor la retracción. (Fernández Cánovas, 2007)

Fernández Cánovas (2007) se expresa sobre la relación Cemento/ Árido e indica que a mayor proporción de árido en el hormigón con respecto al cemento, reduce la retracción de secado para unas determinadas condiciones de humedad y temperatura.

Figura 2.10. Influencia del contenido de árido en la retracción relativa

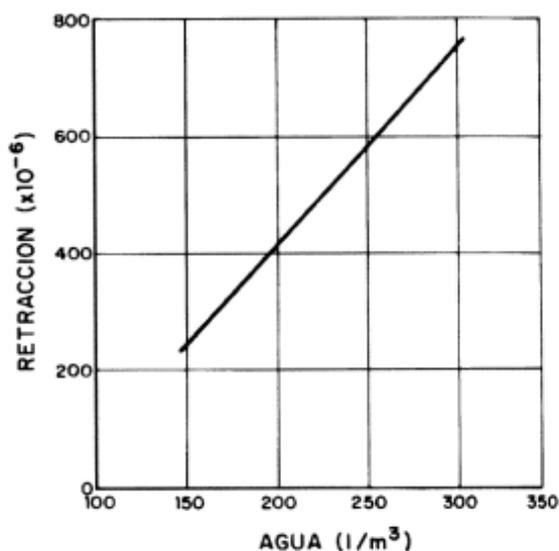


Fuente: Fernández Cánovas (2007)

Por otra parte, también se puede mencionar que la contaminación de los áridos con arcillas de lugar a que aumente la retracción como consecuencia del aporte de las propias arcillas provocando incrementos que a veces llegan a 70%. De este modo, disminuye el poder frenante de la retracción que los áridos ejercen.

**Contenido de agua:** La cantidad de agua de masado como ya se mencionó, es uno de los factores más importantes para el hormigón y que también influyen en la magnitud de la retracción por secado, ya que, conociendo la cantidad de agua de una mezcla de hormigón, se puede obtener un intervalo de valores del orden de la magnitud de la retratación que se presentara en el hormigón. (Fernández Cánovas, 2007)

Figura 2.11. Retracción en función del contenido de agua



Fuente: Fernández Cánovas (2007)

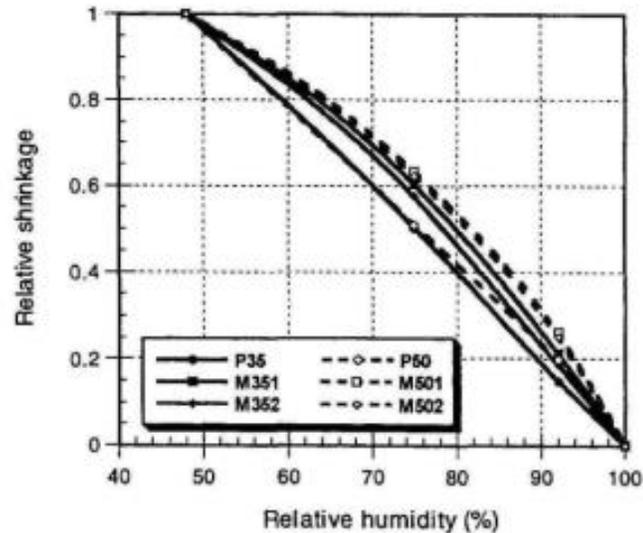
**Finura de molido del cemento:** Mientras el cemento tenga un mayor grado de finura, se establece que se obtendrá una mayor cantidad de partículas que existan en él por unidad de peso. Así también, se experimentará mayores retracciones debido a la pérdida de agua por absorción de las partículas de cemento. (Fernández Cánovas, 2007)

#### 2.2.1.2.2.- Factores ambientales

Considerando que la pérdida de humedad es la causa principal de la retracción de secado, este es uno de los factores que más influyen sobre este fenómeno.

En pastas, la retracción aumenta de forma casi lineal con la disminución en la humedad relativa (Bissonnette et al., 1999).

**Figura 2.12. Relación entre la retracción última relativa y la humedad relativa**



Fuente: Bissonnette et al. (1999).

#### **2.2.1.2.3.- Factores relacionados con el método de ejecución**

Entre los factores relacionados con el método de ejecución tenemos el periodo de curado, tipo de curado, tamaño y forma de la probeta.

Según Neville (1995), los resultados de varias investigaciones sobre este aspecto son contradictorias, pero en general, el período de curado no es un factor importante en la retracción por secado.

Utilizar curado al vapor puede reducir la retracción del hormigón hasta el 30% (Attiogbe et al. 2002).

El tamaño de la pieza es importante en el desarrollo y el valor último de la retracción, ósea que cuando mayor es las dimensiones de la pieza de hormigón, menor será la retracción que se presente, sin embargo, el parámetro que más importa es la cantidad de superficie expuesta.

$$\text{retracción} \propto \frac{1}{\left(\frac{V}{S}\right)^2} \quad (2.2)$$

Según Mindess y Young (1981), en piezas grandes, la velocidad de retracción es menor, pero el valor último es mayor que en piezas pequeñas. Esta relación inversa entre la velocidad de desarrollo y la retracción última está relacionada con la retracción diferencial en el interior de la pieza.

El efecto de la forma de la pieza también influye sobre la retracción, pero según Neville (1995), 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.

### **2.3.- Influencia del curado y condiciones del almacenaje**

Neville (1999) El curado por humedad prolongado retrasa la influencia de la contracción, pero el efecto del curado sobre la magnitud de la contracción es pequeño, aunque más bien complejo, por lo que cuando se realizan curados prologados es de esperarse que se produzcan mayores retracciones, ya que en la elaboración del hormigón aún quedan partículas sin hidratar que llegan a reaccionar en la etapa del curado y son estas las que generan una mayor retracción.

### **2.4.- Modelos predictivos de la retracción**

#### **2.4.1.- Modelo ACI 209-92**

Es el modelo recomendado por American Concrete Institute (ACI) desarrollado por Branson y Christianson en 1971 realizándose modificaciones en la misma en 1982, a partir de entonces no ha sido revisado ni actualizado en el banco de datos de RILEM, siendo un modelo que se sigue comparando con otros modelos, siendo utilizado en el diseño de estructuras.

Una de sus ventajas es que es fácil de usar, solo se requiere de conocimientos previos; entre sus desventajas es que su precisión es limitada, siendo un modelo empírico no modela la retracción.

Este modelo requiere datos de entrada como ser: edad del hormigón cuando comienza el secado, tipo de cemento.

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \frac{(t - t_c)^\alpha}{f + (t - t_c)^\alpha} * \varepsilon_{shu} \quad (2.3)$$

Donde:

$\varepsilon_{sh}(t, t_c)$  : Cepa de retracción a la edad del hormigón de t (días)

$$f = 26e^{[1.42 \times 10^{-2}(V/S)]} \quad (2.4)$$

f: Factor en que depende de la relación V/S

$$\varepsilon_{shu} = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad (2.5)$$

siendo  $\gamma_{sh}$  un coeficiente que representa el producto de todos los factores de corrección.

$$\gamma_{sh} = \gamma_{sh,tc} \gamma_{sh,RH} \gamma_{sh,vs} \gamma_{sh,s} \gamma_{sh,\psi} \gamma_{sh,c} \gamma_{sh,\alpha} \quad (2.6)$$

El factor de corrección  $\gamma_{sh,tc}$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\gamma_{sh,tc} = 1.202 - 0.2337 \log(tc) \quad (2.7)$$

El coeficiente de humedad relativa ambiental  $\gamma_{sh,RH}$  es:

$$\gamma_{sh,RH} = 1.40 - 1.02h \text{ para } 0.40 \leq h \leq 0.8 \quad (2.8)$$

$$\gamma_{sh,RH} = 3 - 3h \text{ para } 0.80 \leq h \leq 1 \quad (2.9)$$

El coeficiente  $\gamma_{sh,vs}$  permite conocer el tamaño del miembro en términos de la relación volumen/superficie, en miembros donde V/S es igual a 37.5 mm el coeficiente es 1,

para miembros con relación volumen/superficie distinta de 37.5 mm (1,5 pulg.), o de un espesor medio espesor distinto de 150 mm (6 pulg.). El espesor medio “d” de un elemento se define como cuatro veces la relación volumen/superficie, es decir;  $d=4V/S$ , que coincide con el doble del espesor real en el caso de una losa.

$$\gamma_{sh,vs} = 1.2e^{(-0.00472(\frac{V}{S}))} \quad (2.10)$$

Donde:

$\gamma_{sh,vs}$  : Factor de tamaño de pieza, relación volumen/superficie

v: Volumen de la pieza ( $\text{mm}^3$ )

s: Superficie de la pieza ( $\text{mm}^2$ )

$$\gamma_{sh,s} = 0.89 + 0.00161s \quad (2.11)$$

Donde:

$\gamma_{sh,s}$  : Factor de asentamiento

s : Asentamiento del hormigón fresco (mm)

$$\gamma_{sh,\psi} = 0.30 + 0.014\psi \text{ para } \psi \leq 50\% \quad (2.12)$$

$$\gamma_{sh,\psi} = 0.90 + 0.002\psi \text{ para } \psi > 50\% \quad (2.13)$$

Donde:

$\gamma_{sh,\psi}$ : Factor de agregado fino

$\psi$  : Relación de agregado fino agregado fino con respecto al agregado total en peso, expresado como porcentaje.

$$\gamma_{sh,c} = 0.75 + 0.00061c \quad (2.14)$$

Donde:

$\gamma_{sh,c}$ : Factor de contenido de cemento

$c$  : Contenido de cemento en  $\text{kg/m}^3$ .

$$\gamma_{sh,\alpha} = 0.95 + 0.008\alpha \geq 1 \quad (2.15)$$

Donde:

$\gamma_{sh,\alpha}$ : Factor de contenido de aire

$\alpha$ : Contenido de aire en porcentaje.

#### **2.4.2.- Modelo Bažant-Baweja B3**

Es uno de los modelos más simples y considerado el mejor teóricamente sustentado en comparación con otros modelos, es un modelo basado en la solidificación, de acuerdo al cual el envejecimiento del hormigón se debe al incremento de volumen de la porción resistente de la materia que ha solidificado.

Es un modelo aplicable a hormigones Portland curados durante por lo menos un día, con las siguientes limitaciones:

$$0,35 \leq \text{agua/cemento} \leq 0,85$$

$$2,5 \leq \text{áridos/cemento} \leq 13,5$$

$$17 \text{ N/mm}^2 \leq f_{c28} \leq 70 \text{ N/mm}^2$$

$$160 \text{ kg/m}^3 \leq \text{cemento} \leq 720 \text{ kg/m}^3$$

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, la retracción se expresa como:

$$\varepsilon_{sh}(t, tc) = \varepsilon_{sh\infty} k_h S_{(t-tc)} \quad (2.16)$$

Donde:

$\varepsilon_{sh\infty}$ : Coeficiente que mide a retracción última

$k_h$ : Coeficiente que tiene en cuenta la humedad relativa

$S_{(t-tc)}$ : Coeficiente que tiene en cuenta el tiempo

Coeficiente que mide la retracción última:

$$\varepsilon_{sh\infty} = \varepsilon_{s\infty} \frac{E_{cm607}}{E_{cm(tc-\tau_{sh})}} \quad (2.17)$$

Donde:

$\frac{E_{cm607}}{E_{cm(tc-\tau_{sh})}}$ : Factor que tiene en cuenta la dependencia temporal de la contracción final

$\varepsilon_{s\infty}$ : Constante proporcionada por la expresión:

$$\varepsilon_{s\infty} = -\alpha_1 \alpha_2 (0.019w^{2.1} f_{cm28}^{-0.28} + 270) \times 10^{-6} \quad (2.18)$$

Donde:

$\alpha_1$  = Coeficiente que depende del tipo de cemento

**Tabla 2.6. Obtención del coeficiente  $\alpha_1$**

Tipo de cemento	$\alpha_1$
Tipo I	1.00
Tipo II	0.85
Tipo III	1.10

Fuente: Belenguer (2015)

$\alpha_2$  = Coeficiente que depende del tipo de curado.

**Tabla 2.7. Obtención del coeficiente  $\alpha_2$**

Tipo de cemento	$\alpha_2$
Curado al vapor	0.75
Curado en agua o con una humedad relativa del 100%	1.00
Sellado durante el curado o curado normal al aire con protección inicial contra el secado	1.20

Fuente: Belenguer (2015)

$$\frac{E_{cm607}}{E_{cm(tc+\tau_{sh})}} = \frac{1.0805}{\left[ \frac{t_c + \tau_{sh}}{4 + 0.85(t_c + \tau_{sh})} \right]^{0.5}} \quad (2.19)$$

Donde:

$\frac{E_{cm607}}{E_{cm(tc+\tau_{sh})}}$ : Factor dependiente del tiempo

$\tau_{sh}$  = es la edad necesaria para que la retracción alcance la mitad de la retracción final, y se estima como:

$$\tau_{sh} = 0.085 t_c^{-0.08} f_{cm28}^{-0.25} \left( 2ks \left( \frac{v}{s} \right) \right)^2 \quad (2.20)$$

### 2.4.3.- Modelo CEB MC90-99

La contracción por secado  $\varepsilon_{cds}(t, t_c)$  se calcula a partir de:

$$\varepsilon_{cds}(t - t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) \beta_{RH}(h) \beta_{ds}(t - t_c) \quad (2.21)$$

Donde:

$\varepsilon_{cds}(t - t_c)$ : Retracción por secado

$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$  es el coeficiente de contracción por secado nominal de la Ecuación

$f_{cm28}$  : Resistencia media a la compresión del hormigón a una edad de 28 días (MPa)

t: Edad del hormigón (días),  $t_1 = 1$  día,

$t_c$ : Edad del hormigón al inicio del secado (días)

$(t - t_c)$  es la duración del secado (días)

$\beta_{RH(h)}$ : Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de la humedad relativa en la contracción por secado.

$\beta_{ds(t - t_c)}$ : Función que describe el desarrollo temporal de la contracción por secado a partir de:

$$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} f_{cm28}/f_{cmo})] \times 10^{-6} \quad (2.22)$$

$$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_o} \right)^3 \right] \text{ para } 0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1} \quad (2.23)$$

$$\beta_{RH}(h) = 0.25 \text{ para } h \geq 0.99\beta_{s1} \quad (2.24)$$

$$\beta_{s1} = \left( \frac{3.5f_{cmo}}{f_{cm28}} \right)^{0.1} \leq 1 \quad (2.25)$$

Donde:

$\alpha_{ds1}$ : Coeficiente que depende del tipo de cemento (Normal=4)

$\alpha_{ds2}$ : Coeficiente que depende del tipo de cemento (Normal=0.12)

#### 2.4.4.- Modelo GL 2000

Fue desarrollado por Gardner y Lockman, es un modelo que requiere de pocas variables para su aplicación, inicialmente fue desarrollado para hormigones con resistencias menores a 82 MPa y relación agua/ cemento entre 0,40 y 0,60.

Además, el periodo de curado debe ser por lo menos de un día.

Las variables para su aplicación son: Edad del hormigón cuando inicia el secado, resistencia a la compresión a los 28 días, módulo de elasticidad del hormigón a los 28 días, humedad relativa, relación volumen/superficie.

La ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$\varepsilon_{sh}(t, tc) = \varepsilon_{shu} \beta(h) \beta(t - tc) \quad (2.26)$$

Donde:

$\varepsilon_{shu}$ : Deformación de contracción secado

$\beta(h)$ : Término de corrección para el efecto de la humedad

$\beta(t - tc)$ : Término de corrección para el efecto del tiempo de secado.

$$\varepsilon_{shu} = 900k \left( \frac{30}{f_{cm28}} \right)^{0.5} \times 10^{-6} \quad (2.27)$$

**Tabla 2.8. Obtención del coeficiente k**

Tipo de cemento	s	k
Tipo I	0.335	1.00
Tipo II	0.40	0.75
Tipo III	0.13	1.15

Fuente: Belenguer (2015)

Donde:

$f_{cm28}$ : Resistencia media a la compresión del hormigón a 28 días en MPa

k: Constante de retracción que depende del tipo de cemento

$$f_{cmo} = 1.1f'c + 5 \quad (2.28)$$

$$\beta(h) = (1 - 1.18h^4) \quad (2.29)$$

$$\beta(t - tc) = \left( \frac{(t - tc)}{(t - tc) + 0.12 \left(\frac{V}{S}\right)^2} \right)^{0.5} \quad (2.30)$$

Donde:

t y tc: Son la edad del hormigón y la edad de secado comienza o termina el curado húmedo en días, respectivamente

V/S: Relación volumen/superficie en mm.

**CAPÍTULO III**  
**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **3.1.- Realización de los ensayos**

Los ensayos realizados de caracterización de materiales, elaboración de probetas y respectivas mediciones de retracción por secado fueron ejecutados en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, los cuales se detallarán a continuación.

### **3.2.- Fabricación del hormigón**

#### **3.2.1.- Materiales**

- Cemento: El Puente
- Áridos: Grava y arena con procedencia de Santa Ana
- Agua: Potable

Un punto muy importante a mencionar es que paralelamente a esta investigación se está realizando la determinación de la retracción por secado utilizando cemento Fancesa, para ser evaluada bajo el entorno ambiental de Tarija.

#### **3.2.2.- Dosificación**

Con los resultados de la caracterización de materiales, se dosifico el hormigón utilizando la norma ACI 211.1, para una resistencia característica a compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup> por ser el valor de resistencia a compresión más común y usado en el entorno.

#### **3.2.3.- Equipo**

En la elaboración se utilizó una mezcladora de volteo lateral, una balanza de capacidad máxima de 60 kg con una precisión de 5 g y otros equipos que se especifican en **1.6.2.c**

**Figura 3.1. Mezcladora de volteo lateral**



Fuente: Elaboración propia

### **3.2.4.- Preparación del hormigón**

En la preparación de la mezcla de hormigón, en primer lugar, se humedeció la mezcladora para que no absorba el agua destinada al hormigón, consecuentemente se vertió la mitad del agua, luego los áridos pétreos (grava y arena) , así también el cemento y para finalizar el restante de agua destinada a la mezcla del hormigón. El proceso de mezclado tuvo una duración de 5 minutos , de esta manera en el amasado se consiguió una mezcla homogénea. Este procedimiento de elaboración se realizó para toda la muestra.

**Figura 3.2. Día de preparación de la mezcla de hormigón**



Fuente: Elaboración propia

### 3.3.- Elaboración de probetas

#### 3.3.1.- Molde

Los moldes que se utilizó para la elaboración de las probetas son de sección cilíndrica estándar, con las siguientes dimensiones:

- Diámetro: 150 mm
- Altura: 300 mm

**Figura 3.3. Moldes cilíndricos**



Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.2.- Llenado de probetas

El llenado de las probetas se realizó en 3 capas, se vertió el hormigón hasta  $1/3$  de la probeta la cual se denomina capa 1, se procedió a compactar con la varilla pisón con 25 golpes teniendo cuidado de no llegar a la base de la probeta, posteriormente se llenó  $2/3$  de la probeta denominado capa 2 ,se ejecutó nuevamente los 25 golpes y para finalizar se llenó la probeta con un ligero exceso de hormigón por encima del límite del molde, nuevamente se realizaron los 25 golpes con la varilla pisón y se enrasa la superficie del molde con la plancha. Para la eliminación de los vacíos que existe dentro del hormigón, se utilizó el martillo de goma para ejecutar los respectivos golpes en los

laterales del molde al finalizar el vertido de cada mencionada capa. Este procedimiento se realizó para todas las probetas.

**Figura 3.4. Enrasado de probetas**



Fuente: Elaboración propia

### **3.3.3.- Desmolde**

Se procedió a desmoldar las probetas cilíndricas de hormigón transcurrido las 24 horas luego de su elaboración.

**Figura 3.5. Desmolde de probetas**



Fuente: Elaboración propia

### **3.3.4.- Curado de probetas**

El curado de las probetas se dividió en 2 partes:

- Las 9 probetas en las que se determinó su resistencia a compresión, tuvieron un curado necesario para ser evaluadas a los 3 , 7 y 28 días.
- Las 12 probetas en las cuales se midió la deformación por retracción de secado, el curado fue de 1 día.

### **3.4.- Mediciones**

#### **3.4.1.- Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión de las probetas cilíndricas fue evaluada a los 3, 7 y 28 días.

#### **3.4.2.- Retracción por secado**

Se fundamenta en la normativa ASTM código C596 Método de prueba estándar de retracción por secado, en el cual se realizaron modificaciones de parámetros de forma como la relación volumen/superficie. Fundamentados por la investigación del profesor Belenguer, en el cual realizó un estudio y análisis de la retracción de hormigones mediante una base de datos de ensayos unificada, y de acuerdo con estas modificaciones poder comparar la retracción por secado con los modelos de estimación.

El proceso de preparación de probetas y mediciones fue el siguiente:

Al culminar el curado de 1 día de las probetas, se procedió a dejarlas secar por 3 horas en las cuales alcanzo un estado saturado superficialmente seco, en este estado se adhiere los discos pequeños en los extremos de las probetas.

Seguidamente se realizó las primeras mediciones de la longitud inicial en las probetas, las cuales fueron denominadas en día **1** (posterior al curado) , el instrumento que se emplea para este procedimiento es el Deformímetro (dispositivo para medir la

variación de longitud) el cual está compuesto de un comparador eléctrico que realiza las mediciones en mm a partir de una calibración estándar a los 300 mm, cabe mencionar que el deformímetro tiene una precisión de 0.001 mm.

**Figura 3.6. Deformímetro**



Fuente: Elaboración propia

Las mediciones se realizaron hasta los 28 días, los días sujetos a análisis son el 7, 14 y 28 en los cuales se desarrolla la comparación con los modelos predictivos que presenta la norma ACI 209.2R.

**Figura 3.7. Medición de la retracción por secado**



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.- Indicadores ambientales

#### 3.5.1.- Humedad relativa

Las mediciones de la deformación por retracción de secado se realizaron en el transcurso de los meses de septiembre-octubre, dado que históricamente en dichos meses es que se tiene humedades relativas inferiores a los 60% según los registros de Senamhi en la estación del Aeropuerto. Las humedades relativas en la ciudad de Tarija durante las mediciones fueron de:

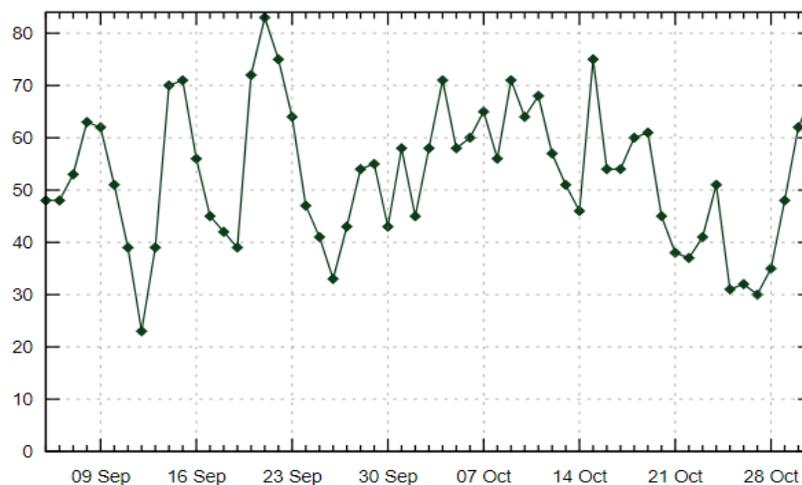
**Tabla 3.1. Humedad relativa durante las mediciones**

Humedad relativa	
Tiempo (Semana)	HR (%)
1	54.8
2	59.2
3	58.7
4	55.3
HR	57.0

Nota: Septiembre-octubre 2021

Fuente: WeatherOnline Ltd.-Meteorological Services

**Figura 3.8. Humedad relativa en la ciudad de Tarija**



Nota: Septiembre-octubre 2021

Fuente: WeatherOnline Ltd.-Meteorological Services

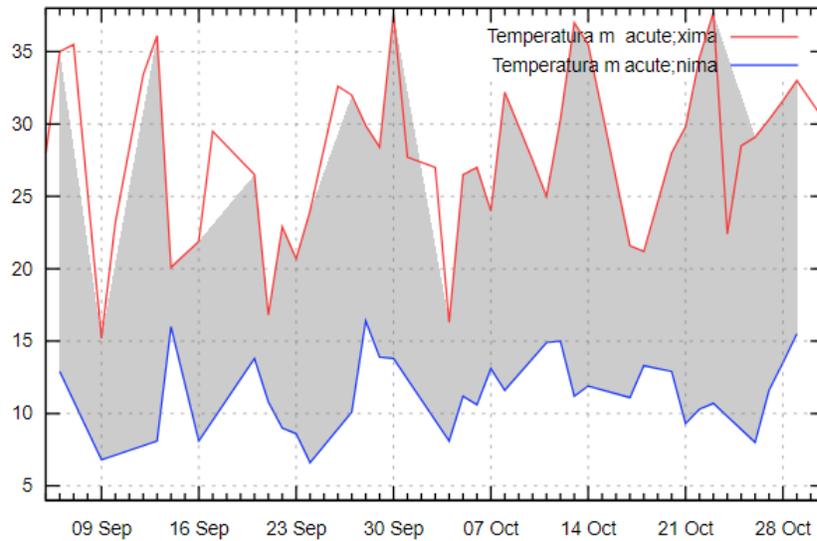
### 3.5.2.- Temperatura

Las temperaturas máximas por lo general estuvieron por encima de los 20°C y las temperaturas mínimas por encima de los 10°C ,excepto en las siguientes fechas:

- 22 y 23 de septiembre
- 4 y 5 de octubre

Las fechas que se mencionan son coincidentes con las edades de la muestra de hormigón en las que presentaron dilatación.

**Figura 3.9. Temperaturas máximas y mínimas en la ciudad de Tarija**



Nota: Septiembre-octubre 2021

Fuente: WeatherOnline Ltd.-Meteorological Services

**CAPÍTULO IV**  
**PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

## 4.1.- Comportamiento de los hormigones

### 4.1.1.- Resistencia a compresión

El hormigón presenta los siguientes parámetros de forma: Sección cilíndrica normalizada (150 mm de diámetro por 300 mm de longitud). En la Tabla 4.1 se expresan las correspondientes resistencias a compresión de los hormigones estudiados en esta investigación, los cuales fueron analizados a los 3 , 7 y 28 días. Elaborados con cemento El Puente y áridos pétreos provenientes de Santa Ana.

**Tabla 4.1. Resistencia a compresión en las probetas de estudio**

	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		
	Día 3	Día 7	Día 28
Probeta 1	78.09	169.48	228.52
Probeta 2	83.82	170.80	227.30
Probeta 3	78.42	172.44	228.02

Fuente: Elaboración propia

### 4.1.2.- Medición de la deformación debido a la retracción de secado

En la Tabla 4.2 se expresan los resultados de las deformaciones que presentan las 12 probetas en las que se midió este tipo de deformación, lo cual tuvo una duración de 28 días. El análisis se realizó en función a los siguientes parámetros:

- Parámetros de forma: Sección cilíndrica normalizada (150 mm de diámetro por 300 mm de longitud)
- Parámetros ambientales: Curado de 1 día y humedad relativa de 57% durante las mediciones septiembre-octubre.
- Parámetros de dosificación: Contenido de cemento (291.23 kg/m<sup>3</sup>), relación agua/cementos (0.57), contenido de agregado fino (787.48 kg/m<sup>3</sup>), contenido de agregado grueso (1115.84 kg/m<sup>3</sup>), contenido de agua (161.41 l/m<sup>3</sup>) y contenido de aire de 1%.

Tabla 4.2. Deformación en la muestra de estudio

Tiempo (Día)	DEFORMACIÓN (mm)												
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 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	-0.025	-0.027	-0.025	-0.025	-0.026	-0.018	-0.018	-0.019	-0.017	-0.023	-0.028	-0.028	-0.028
5	0.003	0.006	0.004	-0.004	0.016	0.000	-0.001	0.012	0.008	0.011	-0.002	0.002	0.002
6	0.022	0.029	0.025	0.019	0.014	0.037	0.022	0.028	0.027	0.020	0.017	0.018	0.018
7	0.026	0.030	0.027	0.035	0.038	0.049	0.025	0.032	0.034	0.029	0.019	0.022	0.022
8	0.037	0.032	0.031	0.051	0.048	0.051	0.046	0.040	0.043	0.043	0.034	0.036	0.036
9	0.044	0.040	0.040	0.055	0.054	0.058	0.056	0.051	0.052	0.058	0.048	0.043	0.043
12	0.066	0.066	0.067	0.073	0.075	0.070	0.071	0.064	0.074	0.067	0.067	0.064	0.064
13	0.071	0.073	0.077	0.079	0.077	0.088	0.085	0.084	0.086	0.084	0.076	0.073	0.073
14	0.071	0.073	0.076	0.075	0.073	0.089	0.081	0.079	0.083	0.079	0.072	0.073	0.073
15	0.074	0.074	0.081	0.077	0.077	0.083	0.086	0.080	0.086	0.081	0.071	0.075	0.075
16	0.073	0.073	0.078	0.077	0.075	0.078	0.078	0.077	0.080	0.074	0.069	0.066	0.066
20	0.088	0.090	0.091	0.087	0.084	0.091	0.089	0.091	0.089	0.090	0.085	0.086	0.086
21	0.090	0.097	0.090	0.091	0.085	0.094	0.089	0.091	0.089	0.093	0.087	0.087	0.087
22	0.090	0.101	0.098	0.094	0.090	0.098	0.091	0.093	0.091	0.098	0.092	0.089	0.089
23	0.097	0.107	0.104	0.096	0.095	0.105	0.095	0.095	0.094	0.100	0.094	0.091	0.091
26	0.105	0.115	0.106	0.097	0.102	0.114	0.100	0.100	0.096	0.104	0.095	0.095	0.095
27	0.106	0.113	0.108	0.099	0.102	0.110	0.100	0.102	0.102	0.105	0.096	0.098	0.098
28	0.102	0.116	0.110	0.096	0.101	0.111	0.101	0.102	0.101	0.108	0.099	0.098	0.098

Nota: (-) Dilatación  
(+) Contracción

Fuente: Elaboración propia

### 4.1.3.- Deformación unitaria

Tabla 4.3. Deformación unitaria en la muestra de análisis

Tiempo (Día)	DEFORMACIÓN UNITARIA (mm/mm) x10 <sup>-6</sup>											
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5	Probeta 6	Probeta 7	Probeta 8	Probeta 9	Probeta 10	Probeta 11	Probeta 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
2	-83.333	-90.000	-83.333	-83.333	-86.667	-60.000	-60.000	-63.333	-56.667	-76.667	-93.333	-93.333
5	10.000	20.000	13.333	-13.333	53.333	0.000	-3.333	40.000	26.667	36.667	-6.667	6.667
6	73.333	96.667	83.333	63.333	46.667	123.333	73.333	93.333	90.000	66.667	56.667	60.000
7	86.667	100.000	90.000	116.667	126.667	163.333	83.333	106.667	113.333	96.667	63.333	73.333
8	123.333	106.667	103.333	170.000	160.000	170.000	153.333	133.333	143.333	143.333	113.333	120.000
9	146.667	133.333	133.333	183.333	180.000	193.333	186.667	170.000	173.333	193.333	160.000	143.333
12	220.000	220.000	223.333	243.333	250.000	233.333	236.667	213.333	246.667	223.333	223.333	213.333
13	236.667	243.333	256.667	263.333	256.667	293.333	283.333	280.000	286.667	280.000	253.333	243.333
14	236.667	243.333	253.333	250.000	243.333	296.667	270.000	263.333	276.667	263.333	240.000	243.333
15	246.667	246.667	270.000	256.667	256.667	276.667	286.667	266.667	286.667	270.000	236.667	250.000
16	243.333	243.333	260.000	256.667	250.000	260.000	260.000	256.667	266.667	246.667	230.000	220.000
20	293.333	300.000	303.333	290.000	280.000	303.333	296.667	303.333	296.667	300.000	283.333	286.667
21	300.000	323.333	300.000	303.333	283.333	313.333	296.667	303.333	296.667	310.000	290.000	290.000
22	300.000	336.667	326.667	313.333	300.000	326.667	303.333	310.000	303.333	326.667	306.667	296.667
23	323.333	356.667	346.667	320.000	316.667	350.000	316.667	316.667	313.333	333.333	313.333	303.333
26	350.000	383.333	353.333	323.333	340.000	380.000	333.333	333.333	320.000	346.667	316.667	316.667
27	353.333	376.667	360.000	330.000	340.000	366.667	333.333	340.000	340.000	350.000	320.000	326.667
28	340.000	386.667	366.667	320.000	336.667	370.000	336.667	340.000	336.667	360.000	330.000	326.667

Nota: (-) Dilatación  
(+) Contracción

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.3 se mostró la deformación unitaria de la muestra de análisis a causa de la retracción por secado, la cual fue determinada en base a los siguientes parámetros:

- Deformación por retracción de secado (mm) Tabla 4.2
- Longitud del deformímetro 300 mm (Instrumento usado para medir la deformación)

#### 4.1.4.- Diagrama Deformación por retracción de secado – Tiempo

En la Tabla 4.4 se muestran la unificación de deformaciones obtenidas a partir de la muestra de análisis, esta unificación fue obtenida mediante un promedio de las deformaciones diarias en las probetas, puesto que los resultados diarios presentados en la Tabla 4.3 son semejantes.

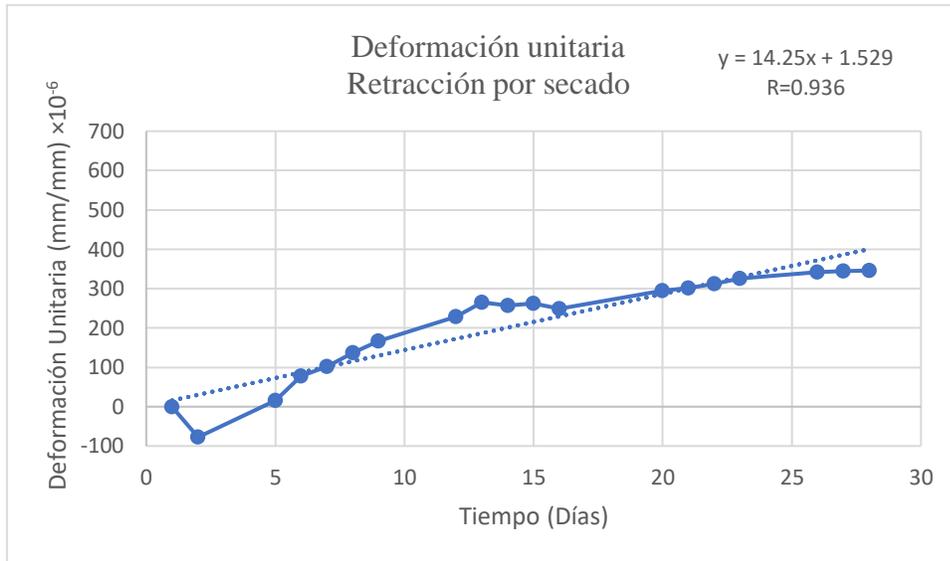
**Tabla 4.4. Deformación unitaria unificada de la muestra de análisis**

<b>Tiempo (Día)</b>	<b>Deformación unitaria Acumulada (mm/mm) x10<sup>-6</sup></b>	<b>Tipo de deformación</b>
1	0.000	-
2	-77.500	Dilatación
5	15.278	Contracción
6	77.222	Contracción
7	101.667	Contracción
8	136.667	Contracción
9	166.389	Contracción
12	228.889	Contracción
13	264.722	Contracción
14	256.667	Dilatación
15	262.500	Dilatación
16	249.444	Dilatación
20	294.722	Contracción
21	300.833	Contracción
22	312.500	Contracción
23	325.833	Contracción
26	341.389	Contracción
27	344.722	Contracción
28	345.833	Contracción

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de Deformación por retracción de secado-Tiempo, también se muestra que existe una buena correlación positiva ( $R=0.936$ ) el cual fue obtenido en base a la unificación de los resultados de la muestra de estudio.

**Figura 4.1. Deformación unitaria por Retracción de secado-Tiempo**



Nota: (-) Dilatación  
(+) Contracción

Fuente: Elaboración propia

## 4.2.- Modelos predictivos de retracción por secado ACI 209.2R

### 4.2.1.- Modelo ACI

Al evaluar el modelo que recomienda la normativa ACI se analizó en función a los siguientes parámetros:

- Parámetros de forma: Probeta cilíndrica normalizada (150 mm de diámetro por 300 mm de longitud)
- Parámetros de dosificación: Contenido de cemento ( $291.23 \text{ kg/m}^3$ ), relación agua/cementos (0.57), contenido de agregado fino ( $787.48 \text{ kg/m}^3$ )
- Parámetros ambientales: Curado durante 1 día y humedad relativa de 57%.

- Parámetros del hormigón: Consistencia (25 mm según ensayo cono de Abrahms) y contenido aire incluido de 1%

En la Tabla 4.5 se exponen los resultados de las deformaciones unitarias debidas a la retracción por secado estimadas con el modelo recomendado por ACI.

**Tabla 4.5. Estimación de la deformación mediante modelo ACI**

Deformación unitaria por retracción de secado	
Tiempo (Día)	Deformación unitaria (mm/mm) x10 <sup>-6</sup>
7	60.666
14	115.380
28	192.569

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2.- Modelo B3 Bazant-Baweja

Para evaluar el modelo que emplea B3 Bazant-Baweja, se tomó los siguientes parámetros:

- Parámetros de forma: Probeta cilíndrica normalizada (150 mm de diámetro por 300 mm de longitud)
- Parámetros de dosificación: Contenido de cemento (291.23 kg/m<sup>3</sup>), relación agua/cemento (0.57), contenido de agregado fino (787.48 kg/m<sup>3</sup>)
- Parámetros ambientales: Curado de 1 día y humedad relativa de 57%.

En la Tabla 4.6 se expone los resultados de la estimación de la deformación unitaria debido a retracción por secado mediante el modelo B3 Bazant

**Tabla 4.6. Estimación de la deformación mediante modelo B3 Bazant**

Deformación unitaria por retracción de secado	
Tiempo (Día)	Deformación unitaria (mm/mm) x10 <sup>-6</sup>
7	72.211
14	106.049
28	152.972

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.3.- Modelo MC90-99

Para poder estimar la retracción por secado mediante el modelo MC90-99 se tomó los siguientes parámetros de referencia:

- Parámetros de forma: Probeta cilíndrica normalizada (150 mm de diámetro por 300 mm de longitud)
- Parámetros ambientales: Humedad relativa de 57%.

En la Tabla 4.7 se muestra los resultados de las deformaciones unitarias debidas a la retracción por secado estimadas mediante el modelo MC90-99.

**Tabla 4.7. Estimación de la deformación por retracción mediante modelo MC90-99**

Deformación unitaria por retracción de secado	
Tiempo (Día)	Deformación unitaria (mm/mm) x10 <sup>-6</sup>
7	109.049
14	157.816
28	220.211

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.4.- Modelo GL2000

Para evaluar el modelo que plantea Gardner y Lockman se han tomado los siguientes parámetros:

- Parámetros de forma: Probeta cilíndrica normalizada (150 mm diámetro por 300 mm de longitud)
- Parámetros ambientales: Humedad relativa de 57%.

En la Tabla 4.8 se expone los resultados de las deformaciones unitarias debidas a la retracción por secado estimadas mediante el modelo GL2000.

**Tabla 4.8. Estimación de la deformación mediante modelo GL2000**

Deformación unitaria por retracción de secado	
Tiempo (Día)	Deformación unitaria (mm/mm) $\times 10^{-6}$
7	167.504
14	241.764
28	335.728

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.- Resumen de resultados

En la Tabla 4.9. se muestra los resultados de las deformaciones unitarias que presentó la muestra de estudio en las mediciones , así también se muestra la estimación de la retracción por secado mediante modelos de estimación que presenta ACI 209-2R y los resultados de la ecuación AASHTO de retracción tomados como elemento comparativo.

**Tabla 4.9. Resumen de resultados de mediciones reales y modelos de estimación**

Tiempo (día)	Medición (mm/mm) $\times 10^{-6}$	ACI (mm/mm) $\times 10^{-6}$	B3 (mm/mm) $\times 10^{-6}$	MC90-99 (mm/mm) $\times 10^{-6}$	GL2000 (mm/mm) $\times 10^{-6}$	AASHTO (mm/mm) $\times 10^{-6}$
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	101.667	60.666	72.211	109.049	167.504	106.19
14	256.667	115.380	106.264	157.816	241.764	196.53
28	345.833	192.569	152.972	220.211	335.728	316.01

Fuente: Elaboración propia

Es de hacer notar que la deformación que presentó la muestra de estudio es mayor que los resultados de las estimaciones de los modelos tanto a los 7, 14 y 28 días, a excepción del modelo GL2000 , MC90-99 y AASHTO que estima una mayor deformación en el día 7.

Los modelos de estimación de B3 Bazant y ACI predicen la deformación con valores similares tanto a los 7 y 14 días, pero están muy por debajo de la deformación real en el análisis del día 28, el modelo de estimación ACI acrecentó su deformación, pero aun por debajo de la deformación real.

El modelo de estimación MC90-99 estima con valores superiores a Bazant y ACI , a pesar de esto, los valores siguen estando por debajo de las deformaciones reales, a excepción del día 7, donde la estimación es mayor que la deformación real.

El modelo GL2000 es el que más se acerca a los valores reales de la deformación por retracción de secado, siendo así que en el día 7 sobrestima el valor real, lo que proporciona un cierto margen de seguridad, en los días 14 , 28 subestima los valores reales por diferencias muy pequeñas en comparación con los otros modelos de análisis.

Las deformaciones obtenidas a partir de la ecuación AASHTO de retracción, son presentadas como elemento comparativo, dicha ecuación es el resultado de una gran cantidad de ensayos realizados y de tal manera se puede verificar en los resultados obtenidos, los cuales son cercanos a los reales.

En la Tabla 4.10 se muestra el porcentaje de error de los modelos de estimación de retracción por secado con referencia a las mediciones reales de este tipo de deformación.

**Tabla 4.10. Porcentaje de error de los modelos de estimación con respecto a las mediciones reales**

<b>Tiempo (día)</b>	<b>ACI (%)</b>	<b>B3 (%)</b>	<b>MC90-99 (%)</b>	<b>GL2000 (%)</b>	<b>AASHTO (%)</b>
7	-40.33	-28.97	7.26	64.76	4.45
14	-55.05	-58.60	-38.51	-5.81	-23.43
28	-44.32	-55.77	-36.32	-2.92	-8.62

Nota: Negativo (-) en contra de la seguridad (Subestima)  
Positivo (+) a favor de la seguridad (Sobrestima)

Se puede observar que los modelos de estimación de ACI, B3 Bazant manejan un porcentaje de error de hasta el -58.60% , lo que significa que subestima las deformaciones reales, esto ocurre tanto a los 7, 14 y 28 días con respecto a las deformaciones reales que se presentan.

En el análisis del modelo de estimación MC90-99 con respecto de las deformaciones reales tanto a los 7, 14 y 28 días presenta un porcentaje máximo de error del 38.51% en el día 14, siendo más efectivo que los modelos ACI y B3 Bazant, pero aun estando

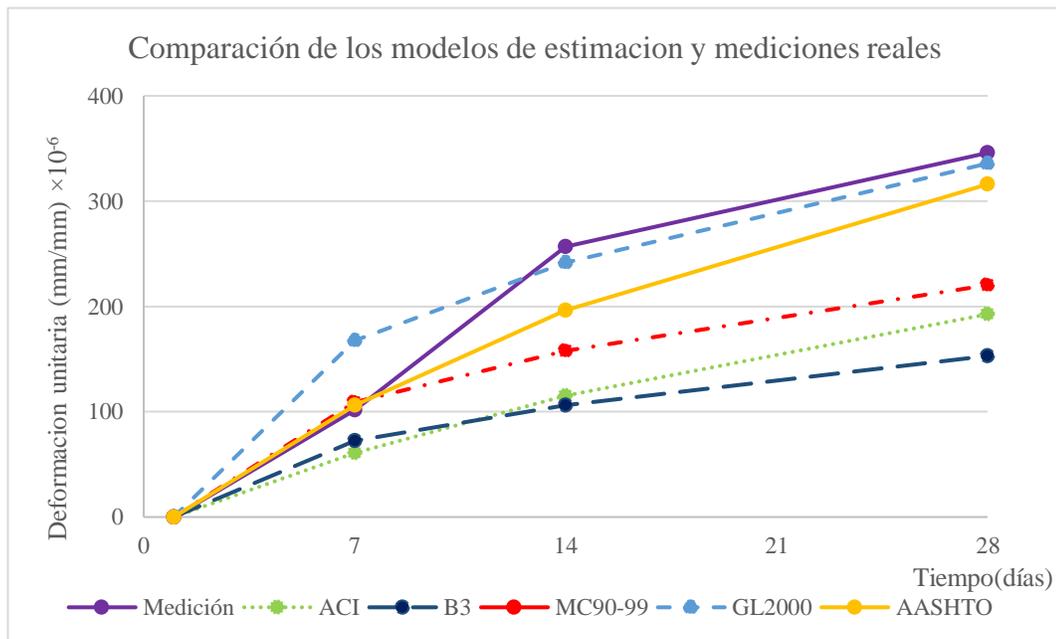
por debajo de la deformación real en los 14 y 28 días, en el día 7, MC90-99 sobreestima la deformación proporcionando un margen de seguridad.

El modelo GL2000 es el que presenta mejores resultados, de tal manera que en el día 7 sobrestima la deformación y en el día 14 y 28 la subestima con un máximo de -5.81% , llegando a demostrar ser más efectivo que el modelo recomendado por MC90-99 y los modelos de ACI y B3 Bazant.

Como elemento comparativo se tiene los porcentajes de error de la ecuación AASHTO, la cual proporciona porcentajes de error de un máximo de 23.43% , siendo más efectivo que los modelos de B3 Bazant, MC-90 y ACI en las condiciones ambientales de la ciudad de Tarija, hormigón elaborado con cemento El Puente y árido proveniente de Santa Ana.

En la Figura 4.2 se muestra una comparación entre deformaciones reales que se presentó y las estimadas mediante los modelos predictivos que menciona ACI 209.2R.

**Figura 4.2. Comparación de modelos de estimación y deformación real**



Fuente: Elaboración propia

Los modelos de estimación de ACI, B3 Bazant y MC90-99 presentan una tendencia similar que se justifica con valores en la Tabla 4.9, a pesar de esto, se puede observar claramente que las deformaciones estimadas por estos modelos subestiman la deformación real.

El modelo GL2000 es el que ofrece mejores resultados que los modelos de estimación precedentes, siendo así, sus valores son muy próximos a la deformación real tanto a los 7,14 y 28 días.

Los resultados de la ecuación AASHTO y del modelo GL2000 son muy similares, pero es de hacer notar que ambos otorgan valores que subestima la deformación real de retracción por secado para hormigones en condiciones ambientales de la ciudad de Tarija, elaborados con cemento El Puente y árido proveniente de Santa Ana.

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

## CONCLUSIONES

- En el transcurso del desarrollo experimental de la investigación se llegó a definir que el método empleado para medir la retracción por secado es muy eficiente, puesto que el deformímetro usado es de mayor precisión que sus predecesores, esto se debe a que cuenta con un comparador eléctrico y no mecánico, obteniendo mayor precisión en las lecturas.
- La muestra de estudio tuvo un comportamiento muy parecido en el análisis de sus deformaciones reales, siendo así que se identificó 2 etapas de retracción.

Día 1: Primera medición luego del curado.

-La primera etapa de retracción comenzó el día 2 hasta el día 13 de manera continua, puesto que se identificó que en el transcurso del día 1 al día 2 toda la muestra de estudio presentó dilatación.

-La segunda etapa de retracción fue identificada a partir del día 16 al día 28, ya que en las mayorías de las probetas se identificó dilatación en el transcurso del día 13 al día 16.

La primera dilatación ocurrió en el transcurso del día 1 al día 2, cuando la temperatura mínima descendió hasta los 7°C como se muestra en la figura 3.9, llegando a humedades relativas altas como se muestra en la figura 3.8 a causa de las lluvias presentadas en los días mencionados. De igual manera en la segunda dilatación ocurrida en el transcurso del día 13 al día 16, la temperatura mínima llegó al orden de los 8°C y la máxima a los 16°C, con humedades relativas altas del orden del 70% según la figura 3.8, ocasionadas por lluvias dentro del entorno ambiental de la ciudad. Exceptuando los días que se presentó dilatación en la muestra de estudio, las temperaturas máximas fueron superiores a los 23°C favoreciendo a la evaporación del agua en el hormigón.

- Un punto muy importante a mencionar, es que la retracción ocasionada por el gradiente de humedad relativa entre las probetas y el entorno que las rodea es de forma irreversible, en cambio, la dilatación y contracción ocasionado por variaciones de temperatura son de menor magnitud y recuperables tal cual se presentó en el transcurso del día 1 al día 2 y del día 13 al día 16.
- En función del diagrama de Deformación unitaria-Tiempo presentado en la figura 4.1, se puede establecer que este tipo de deformación presenta una correlación positiva de datos ( $R=0.936$ ) de tal manera también se identifica que el diagrama tiene una tendencia lineal, así se puede confirmar el comentario de Neville; si bien la deformación por retracción es de carácter volumétrica, en la práctica se ajusta a una deformación lineal.
- La norma ACI 209.2R recomienda mediciones a corto plazo de retracción para así extrapolar los resultados a lo largo del tiempo, esto es muy efectivo, ya que como se identifica en la Figura 4.1, la pendiente de la línea de tendencia es mayor que la generada por la deformación real, por lo tanto, al extrapolar valores a partir de la línea de tendencia, se obtendrá valores con un buen factor de seguridad.
- De acuerdo a la comparación de resultados entre los valores reales y estimados de la retracción por secado, se concluye que, de los cuatro modelos analizados, todos conceden en sus estimaciones valores por debajo de los reales, no habiendo ninguno de ellos que sobrestime este tipo de deformación en el día 28 para las condiciones ambientales de la ciudad de Tarija, hormigón elaborado con cemento El Puente y áridos provenientes de Santa Ana.
- El árido pétreo usado, tanto arena como grava presentaron buena granulometría, siendo así que ambos cumplieron los límites que determina el ensayo ASTM C33. Por otro lado, la arena presentó un módulo de finura igual a 3, clasificándola como arena gruesa, de tal manera se establece que la deformación real de retracción por secado es mayor que a la de los modelos predictivos por dos motivos: por la composición del cemento El Puente y la naturaleza de los áridos pétreos.

- De los cuatro modelos analizados, el que otorga valores más próximos a los valores reales es el GL2000 , siendo así que, en el análisis hasta los 28 días, en el séptimo día llega a estimar un valor con el 64.76% superior a la deformación real y en el día 28 estima un valor con el 2.92% por debajo de la deformación real. (American Concrete Institute ACI, 2008) menciona que las mediciones de retracción en el hormigón elaborado de una misma mezcla pueden variar hasta un 8%, por lo tanto, si el modelo predictivo llega a estar en un más menos 20% de los valores reales, es considerado muy bueno.
- En base a los valores estimados y los reales obtenidos hasta los 28 días, se presenta el siguiente listado considerando que el primero es el que mejor se aproxima a los valores reales y el ultimo el que menos precisión tiene:
  - 1.- Modelo GL2000
  - 2.- Modelo MC90-99
  - 3.- Modelo ACI 209-92
  - 4.- Modelo B3 Bazant
- Tomando en cuenta los resultados de: Las deformaciones reales, la estimación del modelo GL2000 y de la ecuación AASHTO para la estimación de retracción, se llega al punto en que los valores son muy similares, el modelo GL2000 tiene resultados más precisos al compararlo con la muestra de estudio, pero se debe tomar en cuenta que según la normativa ACI 209.2R, este modelo es denominado de *oficina*, en cambio, la ecuación AASHTO es el resultado de un número mucho mayor de ensayos realizados, por lo que se recomienda utilizar la ecuación AASHTO hasta que no se realicen más ensayos físicos de retracción analizando más variables y ampliando la base de datos obtenida.
- Si se requiere determinar la deformación por retracción de secado con exactitud, es necesario realizar ensayos en condiciones de ejecución. Así se podrá evaluar la magnitud de esta deformación en función de la naturaleza, tipo y características de agregados pétreos, tipo de cemento y condiciones ambientales del entorno de análisis.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar el equipo de medición denominado deformímetro para las mediciones de variaciones de longitud por los siguientes puntos:
  - 1.- Cuenta con un comparador eléctrico y no mecánico, por lo cual nos otorga lecturas sin errores de paralaje o de manipuleo.
  - 2.- Tiene una precisión de 0.001 mm, en cambio sus predecesores manejan precisiones de 0.002 mm.
  - 3.- El manejo del equipo para realizar las mediciones es sencillo.
- El trabajo de investigación fue necesario para poder obtener los primeros resultados reales de la deformación a causa de la retracción por secado en la ciudad de Tarija, pero hay que reconocer que no es suficiente y se debe de seguir investigando con la utilización de distintos bancos de áridos de la ciudad, distintas granulometrías (Arenas gruesas y finas), hormigones con resistencias a compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup>, 280 kg/cm<sup>2</sup>, 350 kg/cm<sup>2</sup> elaborados con los diferentes tipos de cementos que se comercializan en Tarija y Bolivia.
- La deformación a causa de la retracción por secado depende de distintas variables, si bien se analizaron las principales como la humedad relativa (septiembre-octubre), cantidad de agua de amasado y cantidad de agregados. Se recomienda utilizar variables como la relación agua/cemento para distintos valores, diferentes tiempos de curado, distintas cantidades de cemento en la elaboración del hormigón y realizar mediciones en las diferentes épocas del año, puesto que tanto la humedad relativa y temperaturas varían.
- En futuras investigaciones se recomienda proseguir con los parámetros de forma planteados por las últimas investigaciones (Sección cilíndrica estándar, 150 mm de diámetro por 300 mm de altura) con la finalidad de seguir ampliando las últimas bases de datos.

- Las mencionadas recomendaciones para futuras investigaciones tienen la finalidad de poder crear una base de datos sólida referentes a la retracción analizando diferentes tipos de variables y de esta manera mediante un análisis estadístico poder llegar a constituirse en una ecuación para determinar la retracción por secado propia de los tarijeños.