

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**TESIS**

**INFLUENCIA DEL TIPO DE CEMENTO EN LA FISURACIÓN  
DEL CONCRETO EN CANALES HIDRÁULICOS  
SUBTERRÁNEOS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR**

**CARLOS JESÚS ESTEBAN CANO POVIS**

**ASESOR**

**MSc. Ing. ISABEL MOROMI NAKATA**

**LIMA- PERÚ**

**2021**

© 2021, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Cano Pavis, Carlos Jesús Esteban

carlos.cano.p@uni.pe

999 267 799 – 332 2754

## **Dedicatoria**

A mis padres y hermanas por su apoyo incondicional, compañía y guía para cumplir las metas que me he propuesto tanto profesionales y personales.

## **Agradecimiento**

A mis padres y hermanas por haberme inculcado valores éticos que me han hecho cumplir todas mis metas correctamente y con respeto al prójimo.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI por aportar con sus valiosos conocimientos para mi desarrollo académico que influyó en mi desarrollo profesional.

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	5
RESUMEN .....	8
ABSTRACT .....	10
PRÓLOGO .....	12
LISTA DE TABLAS .....	13
LISTA DE FIGURAS .....	16
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS .....	18
SÍMBOLOS.....	18
SIGLAS .....	18
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	19
1.1 GENERALIDADES.....	19
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	19
1.3 OBJETIVOS DE ESTUDIO .....	22
1.3.1 Objetivo General: .....	22
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	22
1.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS:.....	22
1.5 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	25
2.1 MARCO TEÓRICO .....	25
2.1.1 Generalidades.....	25
2.1.2 Variables.....	30
2.1.3 Operacionalización de variables.....	31
2.1.4 Tipo de estudio .....	33
2.1.5 Diseño de investigación .....	33
2.1.6 Población, muestra y muestreo.....	33
2.1.7 Justificación teórica y metodológica .....	34
2.1.8 Justificación práctica .....	35

---

2.2	MARCO CONCEPTUAL .....	36
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....		37
3.1	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	37
3.2	METODOLOGÍA .....	37
3.2.1	Ensayo de retracción libre.....	38
3.2.2	Ensayo de retracción restringida .....	41
3.2.3	Elaboración y ensayos de compresión de muestras cilíndricas de concreto 44	
3.2.4	Modelo matemático de retracción .....	47
3.2.5	Diseño de mezcla .....	51
3.2.6	Elaboración de muestras para ensayo .....	57
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.....		60
4.1	Ensayo de Retracción Libre .....	60
4.1.1	Resultados del ensayo de Retracción Libre por diseño.....	60
4.1.2	Comparativo de resultados del ensayo de Retracción Libre.....	67
4.2	Ensayo de retracción restringida .....	69
4.2.1	Resultados del ensayo de retracción restringida por diseño.....	69
4.2.2	Comparativo entre el comportamiento de las fisuras por la retracción restringida y los promedios del ensayo de retracción libre.....	74
4.3	Ensayo a la compresión de muestras cilíndricas .....	79
4.3.1	Resultados del ensayo a la compresión .....	79
4.3.2	Comparativo de los resultados del ensayo a la compresión.....	82
4.4	Retracción total según el modelo matemático MODELO CEB MC90-99 del Comité ACI 209 (2008).....	83
4.4.1	Diseño patrón con cemento tipo I.....	84
4.4.2	Diseño con cemento tipo IP .....	87
4.4.3	Diseño con cemento tipo HE .....	89
DISCUSIÓN.....		93
CONCLUSIONES .....		95

---

---

RECOMENDACIONES .....	97
BIBLIOGRAFÍA .....	98
ANEXOS .....	102
MATRIZ DE CONSISTENCIA GENERAL.....	103
MATRIZ DE CONSISTENCIA ESPECÍFICA.....	104

## RESUMEN

El fenómeno de la fisuración es un problema concurrente en la construcción cuando no se toman las medidas necesarias para su prevención tanto en la etapa de diseño, ejecución u operación generando en la mayoría de los casos una disminución no deseada en la durabilidad e impermeabilidad de la estructura provocando impactos económicos, sociales y en el caso de canales hidráulicos impactos ambientales.

Al hablar de un canal subterráneo de concreto es de suma importancia la adecuada elección del tipo de cemento del diseño de mezcla ya que este debe tener la capacidad de producir en la estructura impermeabilidad, resistencia a sulfatos y cloruros, alta resistencia temprana a la compresión, menor reacción álcali-agregado, entre otras propiedades. Por eso es conveniente identificar la influencia del tipo de cemento en la fisuración en canales hidráulicos subterráneos, para ello como base de la presente investigación se comparó los cementos disponibles en la zona sur del Perú que son los de tipo I, IP y HE que obedecen a las normas técnicas NTP 334.009 (ASTM C150), NTP 334.090 (ASTM C595) y NTP 334.082 (ASTM C1157) respectivamente en las mismas condiciones de diseño de mezcla, fabricación de muestras, almacenamiento y curado.

Para determinar la influencia del tipo de cemento en la fisuración se desarrolló una investigación de tipo correlacional que se basa en un enfoque cuantitativo y cualitativo de lo obtenido en los ensayos experimentales y modelos matemáticos propuestos por el ASTM y ACI respectivamente referidos a la retracción con la influencia en la fisuración, todo ello tomando sólo como variable el tipo de cemento aplicable para una estructura de tipo canal subterráneo.

Para determinar la magnitud de retracción que influye el tipo de cemento se elaboraron los ensayos de retracción libre a través de viguetas indicados en el método ASTM C157 y los ensayos de retracción restringida a través de anillos indicados en el método ASTM C1581, ambos ensayos ya han sido utilizados por otros investigadores de Perú, Chile y Colombia para determinar la influencia de diferentes componentes del diseño de mezcla en la fisuración por retracción en el concreto. Adicional a los ensayos experimentales, se calculará mediante modelos



matemáticos propuestos por el ACI 209.2R la evolución de la retracción teórica total en el tiempo, siendo comparada con los resultados obtenidos por los ensayos experimentales de retracción buscando una posible relación.

Al realizar los ensayos experimentales se concluye que efectivamente el tipo de cemento si influye en el comportamiento de la retracción en los especímenes de muestreo para una dosificación de diseño para canales subterráneos hidráulicos, dando como resultado que el diseño con cemento tipo HE presentó una menor retracción tanto en la variación en longitud de las viguetas y en la aparición en cantidad y tamaño de fisuras en el anillo de concreto respecto a los otros diseños con cemento tipo I y IP.

---

## ABSTRACT

Cracking phenomena is a problem in concurrent construction when the necessary measures for its prevention are not taken both in the design, execution or operation stage, generating in most cases an unwanted decrease in the durability and impermeability of the structure causing economic and social impacts and, in the case of hydraulic channels, environmental impacts.

When talking about an underground concrete channel, the proper choice of the type of cement of the mix design is of utmost importance since it must have the ability to produce impermeability, resistance to sulfates and chlorides, high early resistance to compression, in the structure, less alkali-aggregate reaction, among other properties. That is why it is convenient to identify the influence of the type of cement on cracking in underground hydraulic channels, for this, as a basis for this research, the cements available in the southern part of Peru were compared which are type I, IP and HE that obey to the technical standards NTP 334.009 (ASTM C150), NTP 334.090 (ASTM C595) and NTP 334.082 (ASTM C1157) respectively under the same conditions of mix design, sample manufacture, storage and curing.

To determine the influence of the type of cement in the cracking, a correlational type investigation was developed that is based on a quantitative and qualitative approach of what was obtained in the experimental tests and mathematical models proposed by the ASTM and ACI respectively referred to the shrinkage with the influence on cracking, all of this taking only as a variable the type of cement applicable for an underground channel-type structure.

To determine the amount of shrinkage that influences the type of cement, the free shrinkage tests through joists indicated in the ASTM C157 method and the restricted shrinkage tests through rings indicated in the ASTM C1581 method were performed. It has been used by other researchers from Peru, Chile and Colombia to determine the influence of different components of the mix design on shrinkage cracking in concrete. In addition to the experimental tests, the evolution of the total theoretical shrinkage over time will be calculated using mathematical models proposed by ACI 209.2R, being compared with the results obtained by the experimental shrinkage tests looking for a possible relationship.

When carrying out the experimental tests, it is concluded that indeed the type of cement does influence the behavior of the shrinkage in the sampling specimens for a design dosage for hydraulic underground channels, resulting in that the design with HE type cement presented a lower shrinkage. both in the variation in length of the joists and in the appearance in quantity and size of cracks in the concrete ring with respect to the other designs with type I and IP cement.

---

## PRÓLOGO

Los cambios volumétricos en el concretos pueden producir fisuras indeseables que afecten la impermeabilidad y durabilidad de las obras de construcción, especialmente aquellas que están en contacto con la humedad o el agua ú otro fluido.

Muchos factores influyen en el comportamiento del concreto, desde las características de los materiales, el diseño de las mezclas, los procedimientos la fabricación, colocación, curado del concreto hasta los procesos de operación y mantenimiento de la obra.

El presente estudio ha analizado la influencia del tipo de cemento en la generación de fisuras en el concreto de canales de conducción de agua.

Con este trabajo se espera incrementar la información disponible sobre el tema, de manera que contribuya a tomar mejores decisiones para lograr la impermeabilidad y durabilidad requerida para este tipo de obras de acuerdo con las Normas vigentes

MSc. Ing. Isabel Moromi Nakata  
Asesora

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tolerancias del ancho de fisuras según condición de exposición .....	26
Tabla 2 Clases y tipos de cemento portland.....	27
Tabla 3 Operacionalización de variable Independiente .....	31
Tabla 4 Operacionalización de variable dependiente .....	32
Tabla 5 Causas de fisuración según el ACI224 .....	33
Tabla 6 Clasificación potencial por agrietamiento.....	44
Tabla 7 Rango de parámetros por modelo matemático .....	48
Tabla 8 Tabla de coeficientes según tipo de cemento del modelo CEB MC90-99 .....	50
Tabla 9 Tipos de cemento empleados en la investigación.....	52
Tabla 10 Propiedades físicas del agregado fino .....	53
Tabla 11 Análisis Granulométrico del agregado fino .....	53
Tabla 12 Propiedades físicas del agregado grueso.....	54
Tabla 13 Análisis granulométrico del agregado grueso .....	54
Tabla 14 Parámetros de diseño de mezcla de un canal de concreto subterráneo .....	56
Tabla 15 Diseño de mezcla de control .....	57
Tabla 16 Estimación del volumen de la tanda por diseño de mezcla.....	58
Tabla 17 Dosificación de tanda de muestreo.....	59
Tabla 18 Resultados del ensayo de Retracción Libre para el diseño patrón con cemento tipo I .....	60
Tabla 19 Variación promedio de la retracción libre en longitud del diseño patrón .....	61
Tabla 20 Resultados del ensayo de Retracción Libre para el diseño con cemento tipo IP.....	63
Tabla 21 Variación promedio de la retracción libre en longitud del diseño con cemento tipo IP.....	64
Tabla 22 Resultados del ensayo de Retracción Libre para el diseño con cemento tipo HE .....	65
Tabla 23 Variación promedio de la retracción libre en longitud del diseño con cemento tipo HE .....	66
Tabla 24 Resumen de resultados del promedio del ensayo de Retracción Libre por diseño.....	68

Tabla 25 Resultados del ensayo de retracción restringida para el anillo con el diseño patrón con cemento tipo I.....	69
Tabla 26 Resultados del ensayo de retracción restringida para el anillo con el diseño con cemento tipo IP.....	71
Tabla 27 Resultados del ensayo de retracción restringida para el anillo con el diseño con cemento tipo HE .....	73
Tabla 28 Resultados promedio de los ensayos de retracción libre y retracción restringida para el diseño patrón elaborado con cemento tipo I .....	75
Tabla 29 Resultados promedio de los ensayos de retracción libre y retracción restringida para el diseño elaborado con cemento tipo IP.....	76
Tabla 30 Resultados promedio de los ensayos de retracción libre y retracción restringida para el diseño elaborado con cemento tipo HE .....	78
Tabla 31 Resultados del ensayo a la compresión de las muestras del diseño patrón con cemento tipo I .....	79
Tabla 32 Resultados del ensayo a la compresión de las muestras del diseño con cemento tipo IP.....	80
Tabla 33 Resultados del ensayo a la compresión de las muestras del diseño con cemento tipo HE .....	81
Tabla 34 $F'c$ promedio según tipo de cemento.....	82
Tabla 35 Retracción por secado para el diseño patrón con cemento tipo I según el modelo CEB MC90-99 .....	84
Tabla 36 Retracción autógena para el diseño patrón con cemento tipo I según el modelo CEB MC90-99 .....	85
Tabla 37 Retracción total para el diseño patrón con cemento tipo I según el modelo CEB MC90-99.....	86
Tabla 38 Retracción por secado para el diseño con cemento tipo IP según el modelo CEB MC90-99.....	87
Tabla 39 Retracción autógena para el diseño con cemento tipo IP según el modelo CEB MC90-99.....	88
Tabla 40 Retracción total para el diseño con cemento tipo IP según el modelo CEB MC90-99 .....	88
Tabla 41 Retracción por secado para el diseño con cemento tipo HE según el modelo CEB MC90-99.....	90
Tabla 42 Retracción autógena para el diseño con cemento tipo HE según el modelo CEB MC90-99.....	91

---

Tabla 43 Retracción total para el diseño con cemento tipo HE según el modelo CEB MC90-99 .....	91
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fuentes genéricas de la patología en edificación .....	20
Figura 2 Tipos de retracción.....	29
Figura 3 Diagrama de flujo del método hipotético-deductivo. ....	37
Figura 4 Molde metálico para especímenes tipo viga con orificio para tornillo .....	38
Figura 5 Aparato de medición de cambio de longitud.....	39
Figura 6 Barra de referencia en el equipo medidor de longitud .....	40
Figura 7 Lectura de longitud de viga .....	40
Figura 8 Dimensiones del anillo para la inspección visual de la fisuración por retracción restringida .....	41
Figura 9 Desencofrado de anillos de concreto .....	42
Figura 10 Anillos de concreto en la cámara de curado del LEM UNI .....	42
Figura 11 Regla de Fisuras .....	43
Figura 12 Medición de fisura en anillo de concreto.....	43
Figura 13 Probetas cilíndricas del diseño con cemento HE. Fuente: Elaboración propia .....	45
Figura 14 Equipo de ensayo a compresión de probetas cilíndricas .....	45
Figura 15 Pantalla digital de la máquina de ensayos a compresión LEM-UNI46	
Figura 16 Huso granulométrico del Agregado Fino .....	53
Figura 17 Huso granulométrico del Agregado Grueso.....	55
Figura 18 Gráfica de los resultados del ensayo de retracción libre para el diseño con cemento tipo I .....	61
Figura 19 Variación promedio de retracción libre para el diseño patrón .....	62
Figura 20 Gráfica de los resultados del ensayo de retracción libre para el diseño con cemento tipo IP .....	63
Figura 21 Variación de retracción libre para el diseño de mezcla con cemento tipo IP .....	64
Figura 22 Gráfica de los resultados del ensayo de retracción libre para el diseño con cemento tipo HE. Elaboración propia .....	66
Figura 23 Variación de retracción libre para el diseño de mezcla con cemento tipo HE.....	67
Figura 24 Gráfica del ensayo de Retracción Libre por diseño .....	68



Figura 25 Gráfica del control de fisuración en anillo de diseño patrón con cemento tipo I .....	70
Figura 26 Gráfica del control de fisuración en anillo de diseño con cemento tipo IP .....	72
Figura 27 Gráfica del control de fisuración en anillo de diseño con cemento tipo HE. ....	73
Figura 28 Gráfica del comportamiento de los resultados del ensayo de retracción libre con el de retracción restringida en el tiempo para el diseño patrón con cemento tipo I .....	75
Figura 29 Gráfica del comportamiento de los resultados del ensayo de retracción libre con el de retracción restringida en el tiempo para el diseño con cemento tipo IP. Elaboración propia .....	77
Figura 30 Gráfica del comportamiento de los resultados del ensayo de retracción libre con el de retracción restringida en el tiempo para el diseño con cemento tipo HE. ....	78
Figura 31 Gráfica del ensayo a la compresión del diseño patrón con cemento tipo I.....	80
Figura 32 Gráfica del ensayo a la compresión del diseño con cemento tipo IP .....	81
Figura 33 Gráfica del ensayo a la compresión del diseño con cemento tipo IP .....	82
Figura 34 Gráfica de los $f'c$ promedio según tipo de cemento .....	83
Figura 35 Gráfica de la curva de retracción del Modelo matemático (CEB MC90-99) y del ensayo experimental (ASTM C157) para el diseño patrón con cemento tipo I.....	86
Figura 36 Gráfica de la curva de retracción del Modelo matemático (CEB MC90-99) y del ensayo experimental (ASTM C157) para el diseño con cemento tipo IP .....	89
Figura 37 Gráfica de la curva de retracción del Modelo matemático (CEB MC90-99) y del ensayo experimental (ASTM C157) para el diseño con cemento tipo HE .....	92

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### SÍMBOLOS

- $\alpha_{as}$  : Coeficiente que depende del tipo de cemento
- $\alpha_{ds1}$  : Coeficiente de corrección 1 por efecto del tipo de cemento
- $\alpha_{ds2}$  : Coeficiente de corrección 2 por efecto del tipo de cemento
- $\beta_{as}(t)$  : Función que describe el desarrollo de la retracción autógena en el tiempo
- $\beta_{ds}(t - t_c)$  : Función del desarrollo de la retracción por secado en el tiempo
- $\beta_{RH}(h)$  : Coeficiente de corrección del efecto de la humedad relativa en la retracción por secado
- $\beta_{s1}$  : Coeficiente basado en la autodesecación en el concreto de alto
- $\epsilon_{caso}(f_{cm28})$  : Coeficiente nocional de retracción autógena
- $\epsilon_{cdso}(f_{cm28})$  : Coeficiente teórico de retracción por secado en  $mm/mm$
- $f_{cmo}$  : 10 MPa (Valor definido por el modelo CEB MC90-99)
- $f_{cm28}$  : Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (Mpa)
- G** : Longitud de la barra de referencia y de la muestra, 250mm
- h** : Humedad relativa en decimales
- $h_o$  : 1 (Valor definido por el modelo CEB MC90-99)
- $L_o$  : Lectura inicial de longitud en el comparador en el primer día (mm)
- $L_t$  : Lectura de longitud en el comparador en la edad "t" (mm)
- $\Delta L_t$  : Variación porcentual en longitud de la muestra a la edad "t" (%)
- $(t - t_c)$  : Duración de la retracción (días)
- $V/S$  : Ratio volumen - superficie de la muestra en  $mm^3/mm^2 \leftrightarrow mm$
- $(V/S)_o$  : 50mm (Valor definido por el modelo CEB MC90-99)

### SIGLAS

- ASTM** : American Society for Testing and Materials
- NTP** : Norma Técnica Peruana
- ACI** : American Concrete Institute
- LEM-UNI** : Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

Cabrerizo (2017) indica que las patologías en la construcción se manifiestan de diferentes maneras en las estructuras como cambios de coloración, hinchazones, fisuración, agrietamiento, entre otros, afirma que “en las estructuras de concreto armado, la fisuración representa uno de los síntomas patológicos más importantes de su comportamiento en servicio” (p. 18).

Las causas que originan la fisuración según Toirac (2004) son de origen químico como los cambios derivados por la hidratación del cemento, variaciones de temperatura y ataques químicos; y de origen físico como cargas externas que originan esfuerzos, retracción y entumecimiento, acompañado con el nivel de retracción de la estructura para su expansión o contracción (p. 75).

La reparación de fisuras de una estructura como canales hidráulicos puede impactar considerablemente en el costo del proyecto ya que mayormente la reparación de fisuras no es reconocida por el cliente y mayormente no son presupuestadas en el costo del proyecto donde su ocurrencia generan pérdidas tanto para el constructor ya que serían costos no reconocidos y como para el cliente que tendría un atraso en la recepción de obra y los beneficiarios del proyecto ya que habría una incertidumbre de la calidad del proyecto pudiendo generar problemas económicos, sociales y en algunos casos ambientales.

### 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Desde la aparición del uso del concreto en la construcción, la identificación y estudio de las distintas patologías que podría presentar el concreto durante su vida útil se han desarrollado considerablemente para el incremento de la durabilidad del concreto de dichas estructuras. Lopez, Rodriguez, Santa Cruz, Torreño y Ubeda (2004) refieren que el origen de las patologías en un proyecto de edificaciones que se generan en la fase de ingeniería son relevantes frente a otras fases de la ejecución de un proyecto (ver Figura 1) reflejado también en proyectos

de obras civiles como puentes, túneles, carreteras, etc. Debido a que si desde la etapa de ingeniería no se analizan bien los parámetros de diseño podrían originar la ocurrencia de alguna patología en las siguientes fases del proyecto.

### Origen de patologías en edificaciones

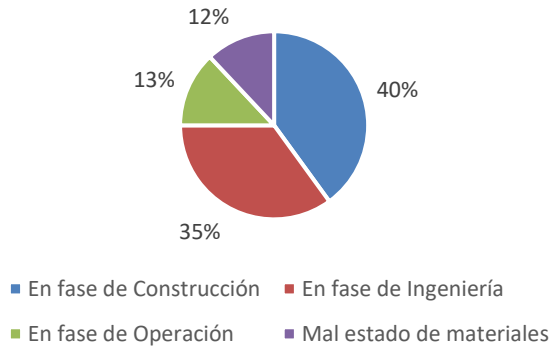


Figura 1 Fuentes genéricas de la patología en edificación  
Fuente: Manual de patología de la edificación (2004)

El Comité ACI 224 (2007) refiere que una de las causas de fisuración del concreto en estado endurecido es la retracción por secado, que se da por la pérdida considerable de humedad en la pasta de cemento produciendo una variación de volumen de la estructura; que conlleva a la generación de tensiones que podrían superar las tensiones admisibles, produciendo fisuración y en algunos casos extremos agrietamiento. Según algunos autores el método más conveniente para medir la retracción del concreto en estado endurecido es el método descrito en el ASTM C157-08, que consiste en la medición de la variación de longitud de una muestra tipo vigueta en el tiempo (Hermida, González y Romero, 2005).

Las fisuras como tal son unos de los problemas patológicos más importantes que pueden afectar la durabilidad de estructuras de concreto, que al no ser identificadas correctamente y no darle el tratamiento adecuado podría generar significativos problemas estructurales.

En obras hidráulicas de concreto, la identificación de la causa de la fisuración en estructuras que se encuentren en contacto permanente con elementos fluidos es sumamente importante ya que si no son detectadas ni identificadas y no son tratadas correctamente antes del funcionamiento del proyecto la fisuración puede afectar directamente a la durabilidad de la estructura hidráulica. Además, en un proyecto hidráulico de conducción de agua para el consumo humano y riego es

sumamente importante asegurar la durabilidad de la estructura y que cumpla con la vida útil proyectada conservando la calidad del agua ya que un cambio de las características de esta puede generar impactos ambientales, económicos, sociales y/o en la salud de la población que se beneficia del agua que transporta el canal, lo que llevaría a que los proyectos de inversión sean inviables y/o paralizados.

Es necesario identificar los diferentes factores que pueden provocar la fisuración en una estructura de concreto como es la magnitud de retracción, los grados de restricción o libertad de la estructura, el módulo de elasticidad, el módulo de fluencia, entre otros. Centrándose al factor de la magnitud de retracción, esta puede ser influenciada por diferentes variables como es la cantidad y calidad de agregados, relación de a/c, cantidad de adiciones, tipo de cemento y entre otros. En consecuencia, para un canal de un túnel que transporta agua para el consumo y riego de cultivos, es necesario la correcta elección del tipo de cemento del diseño de mezcla ya que esta debe de tener características esenciales como la baja reactividad a las aguas de infiltración, baja porosidad, alta resistencia temprana, entre otras propiedades; sin dejar de lado la influencia en la retracción de los elementos de concreto del canal, esta debe ser evaluada en base a los ensayos de retracción libre (ASTM C157) y retracción restringida (ASTM C1581). La presente investigación tomará la comparación de la influencia de tres tipos de cemento con la fisuración

Lo que conlleva a que la presente investigación sostenga como problema general lo siguiente, “¿Cómo influye el tipo de cemento con la fisuración del concreto en canales hidráulicos subterráneos?”

En ese sentido se tiene como referencia en el presente estudio, un proyecto de obras civiles de un túnel de desvío de río en una mina ubicada en la región de Moquegua, el cual consiste en un canal hidráulico de concreto subterráneo de aproximadamente 7.6 kilómetros de extensión; el cual se tomará como referencia el diseño de ingeniería para la determinación de los parámetros de diseño de mezcla de la presente investigación.

### 1.3 OBJETIVOS DE ESTUDIO

#### 1.3.1 Objetivo General:

Identificar la influencia del tipo de cemento en la fisuración en canales hidráulicos subterráneos de concreto tomando como referencia el proyecto de obras civiles de un túnel de desvío de río en una mina ubicada en la región de Moquegua

#### 1.3.2 Objetivos Específicos:

- Identificar la influencia del tipo de cemento en el comportamiento de la retracción libre (ASTM C157) en canales de concreto hidráulicos subterráneos
- Identificar la influencia del tipo de cemento en la inspección visual en el tiempo de anillos de concreto simulando retracción restringida (ASTM C1581) en canales de concreto hidráulicos subterráneos

### 1.4 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS:

El tipo de cemento de un diseño de mezcla de concreto para canales hidráulicos subterráneos influye en la fisuración del canal.

### 1.5 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El método indicado por el Comité ASTM C09 en el informe ASTM C157-17 permite medir la capacidad de retracción que pueden tener diferentes tipos de diseños de mezcla de concreto y generar una correlación entre la magnitud de retracción y la posibilidad de fisuración que podría tener una estructura; sin embargo, el Comité ACI 224 indica que no sólo la magnitud de retracción influye en el grado de fisuración sino también por la combinación de otros factores como los grados de restricción, el módulo de elasticidad y el módulo de fluencia lenta, también llamado "creep".

Munizaga, en el año 2009, en su tesis de grado elaborada en Chile con el título de “Fisuración por retracción en hormigones: Influencia del tipo de cemento”, analizó la influencia de la cantidad de puzolana en el cemento con la retracción por secado mediante los ensayos de retracción libre (ASTM C157) y retracción restringida (ASTM C1581) y concluyó que a mayor contenido de puzolana en la pasta de cemento mayor es la magnitud de la retracción durante los primeros 28 días de edad determinando una relación de la cantidad de puzolana con la retracción por secado.

Coaila y Loayza, en el año 2015, en su tesis de grado elaborada en Perú denominada “Influencia de la relación agua cemento y el agregado fino en la retracción y/o contracción para concretos en Arequipa” utilizó para su diseño de mezcla cemento tipo IP (NTP 334.090) en proporciones variables para ver la influencia de la relación agua cemento (a/c) con la retracción del concreto y obtuvo valores de retracción libre a los 28 días de 0.072% y 0.069% con a/c de 0.40 y 0.45 respectivamente utilizando la metodología indicada en el ASTM C157-08.

Hermida, González y Romero, en el año 2005, en su investigación realizada en Colombia titulada “Agrieto luego existo, la retracción del concreto” utilizó para la evaluación de retracción libre en estado endurecido los procedimientos indicados en los artículos ASTM C157 y ASTM C490, en condiciones de almacenamiento de viguetas a 60-70% HR y  $22^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$  obteniendo un grado de correlación entre la magnitud de retracción en función del contenido de agregados ( $\text{lt}/\text{m}^3$ ) en la mezcla.

El Comité ACI 209 en su artículo titulado “Guía para modelo y cálculo de la Retracción y fluencia en el hormigón endurecido” con revisión en el 2008, obtuvo los modelos de cálculo de la magnitud de retracción para diseños de mezcla según sus características del tipo de cemento utilizado, resistencia a la compresión ( $f'c$ ) de diseño, tipo de curado y humedad relativa del curado, los cuales determinan con qué modelo de cálculo se determina la magnitud de retracción.

Cárcamo y Mancila, en el año 2013, en su tesis de grado denominada “Determinación de la curva inicial de retracción de fraguado de concretos elaborados utilizando adición de ceniza volante” concluyeron que los valores de

retracción obtenidos en los especímenes tipo viga de laboratorio utilizando la normativa ASTM C157 son apenas una fracción de los valores calculados por el método ACI 209.2R – “Guía para modelo y cálculo de la Retracción y fluencia en el hormigón endurecido”.



## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1 Generalidades

Partiendo desde la perspectiva etimológica, la palabra patología proviene de las raíces griegas *phatos* y *logos* que se define como el estudio de una enfermedad (Broto, 2006, p. 6). Por extensión, la patología del concreto se define como el estudio de la enfermedad, daños o defectos que puede sufrir el concreto generados en la etapa de ingeniería, construcción u operación de una estructura provocados por agentes internos o externos (León, 2015, p. 55). Un correcto estudio patológico identifica el origen, causas, síntomas, evolución y medidas de reparación del problema o deterioro evidenciado en una estructura de concreto por ejemplo mediante coloración, fisuras, desprendimientos de concreto, corrosión, etc. (Lopez et al., 2004).

Las fisuras en el concreto son aquellas aberturas incontroladas de una estructura que se presentan en la superficie y dependiendo de su magnitud (grosor y profundidad) pueden causar daños potencialmente estructurales (Toirac, 2004, p. 74). Estas mayormente son generadas por esfuerzos de tensión que superan los esfuerzos admisibles del concreto, tuberías embebidas en el concreto, malas prácticas constructivas, mal diseño de ingeniería, entre otras condiciones que producen fisuración (Toirac, 2004, p. 73).

Los canales hidráulicos son obras de ingeniería importantes que tienen como función principal conducir el agua de una forma direccionada entre dos puntos de distintas cotas para pasar obstáculos y/o desviar intencionadamente un flujo natural de agua para su aprovechamiento, los canales trabajan a gravedad y a una pendiente no tan pronunciada para evitar problemas de socavación en el revestimiento de estos (León, 2015, p. 54).

Los canales hidráulicos subterráneos se caracterizan por estar revestidos de concreto, ya que protegen al fluido de algún contacto con las aguas de infiltración que según el tipo de terreno al tener contacto con el fluido transportado puede

alterar sus propiedades físicas y químicas provocando una contaminación de esta que ocasionaría un potencial impacto ambiental y social (Osorio, 2016). Sin embargo, los canales hidráulicos subterráneos al ser estructuras de concreto podrían a sufrir patologías que afectan la permeabilidad de la estructura por diferentes factores como materiales de construcción, proceso constructivo, agentes ambientales externos, entre otros; como es el caso de la patología de la fisuración que al no ser identificada, evaluada y reparada en su debido tiempo causará que la estructura no sea lo suficientemente impermeable para que el fluido que transporta no tenga contacto con las aguas de infiltración (Osorio, 2016).

El Comité ACI 224 (2008) en la guía Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón (ACI 224R-1R) recomienda las tolerancias permisibles para el ancho de fisuras según su condición de exposición como se muestra en la Tabla 1, para estructuras con exposición a humedad la tolerancia es de 0.30mm y para estructuras de retención de agua la tolerancia máxima es de 0.10mm dependiendo de la exigencia del proyecto pero no mayor a 0.30mm.

Tabla 1

Tolerancias del ancho de fisuras según condición de exposición

Condición de exposición	Ancho de fisura permitido (mm)
Aire seco o protección con alguna membrana	0.41
Humedad, aire húmedo, suelo	0.3
Químicos	0.18
Agua de mar	0.15
Estructuras de retención de agua	0.10

Tabla adaptada de la guía Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón - ACI 224R-1R (2008) por el Comité ACI 224.

La impermeabilidad de una estructura de concreto depende de las características del diseño de mezcla y un factor importante es la elección del tipo de cemento que se utilizará, Avalo (2016) miembro del Comité técnico de la Asociación de Productores de Cemento (ASOCEM) en su cátedra titulada “Las normas técnicas de cemento y concreto en el Perú” menciona las diferentes clases y tipos de cemento fabricados y/o disponibles en el Perú según su procedencia, sus adiciones y performance, lo que se muestra en la Tabla 2. La elección del tipo

de cemento dependerá de las condiciones a las que se someterá la estructura para garantizar su durabilidad como la resistencia a los sulfatos, a la compresión inicial alta, agentes químicos específicos, calor de hidratación controlado, entre otras características solicitadas por el diseñador según requerimiento del proyecto.

Tabla 2

*Clases y tipos de cemento portland*

<b>Clase de Cemento / Norma Técnica</b>	<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Características</b>
Cementos Portland / NTP 334.009 – ASTM C150	I	De uso general
	II	Moderada resistencia a los sulfatos
	II (MH)	Moderado calor de hidratación
	III	Alta resistencia inicial
	IV	Bajo calor de hidratación
Cementos Portland Adicionados / NTP 334.090 – ASTM C595	V	Alta resistencia a los sulfatos
	IP	Cemento con 15%-40% de puzolana
	IPM	Cemento con menos de 15% de puzolana
	IS	Cemento con 25% - 70% de escoria
	ICo	Cemento Compuesto con materiales calizas y/o inertes hasta un 30%
	IL	Cemento Calizo
Cementos Portland de Performance / NTP 334.082 – ASTM C1157	IT	Cemento ternario, combinación de dos puzolanas diferentes
	GU	Uso general
	HE	Alta resistencia inicial
	MS	Moderada resistencia a los sulfatos
	HS	Alta resistencia a los sulfatos
C1157	MH	Moderado calor de hidratación
	LH	Bajo calor de hidratación

Tabla adaptada de "Las normas técnicas de cemento y concreto en el Perú" por Avalo (2016)

El estudio partirá de la influencia de tres tipos de cemento, disponibles en la zona sur del Perú, en la fisuración en elementos de concreto, los cuales son el tipo I, tipo IP y tipo HE. El cemento tipo I es convencional y de uso general, se caracteriza por ser el más común entre todos los cementos ofertados en el Perú (UNACEM, 2012). El cemento tipo IP de Yura según la Ficha técnica del cemento multi-propósito tipo IP se caracteriza por tener una alta durabilidad, alta resistencia a los sulfatos y cloruros, incremento de impermeabilidad y alta resistencia a la compresión en edades avanzadas (Cementos YURA, 2019). El cemento tipo HE de Yura según la Ficha Técnica del cemento industrial Tipo HE se caracteriza por tener alta resistencia inicial a la compresión, incremento de impermeabilidad, moderada resistencia a los sulfatos, menor calor de hidratación, mayor plasticidad y trabajabilidad y menor reacción álcali-agregado (Cementos YURA, 2018).

El Comité ACI 209, 2008 define a la retracción como “la deformación medida en un espécimen de concreto libre de carga” (p. 7). Investigadores como Gómez (2015) definen a la retracción como “la disminución del volumen del concreto en el tiempo debida a cambios en el contenido de humedad y cambios físicos químicos en el concreto que ocurren sin acción de esfuerzos externos” (p. 1). Los investigadores Giani, Navarrete, & Bustos (2008) se refieren que hay dos tipos de retracción según su ocurrencia, la retracción plástica que ocurre antes del inicio de la fragua del concreto causada por la evaporación del agua sobre la superficie del concreto fresco; y, la retracción en estado endurecido que se genera luego del inicio de la etapa de fragua.

Varios autores coinciden en la identificación de subtipos de la retracción en estado endurecido como es la retracción por secado o hidráulica, retracción por carbonatación, retracción térmica y retracción autógena. Los diferentes subtipos de retracciones que puede experimentar una estructura se suman entre sí y se determina la retracción total tal como se muestra en la Figura 2.

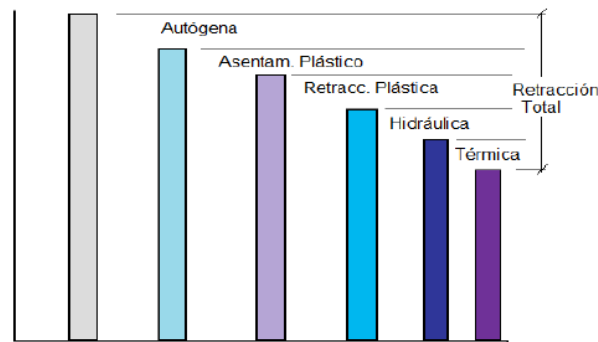


Figura 2 Tipos de retracción  
Fuente: Retracciones en el concreto (2015)

El Comité ASTM C09 (2017) en su procedimiento descrito en el artículo ASTM C157 – “Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto” permite determinar las variaciones en proporciones de longitud de vigas de mortero o concreto con dimensiones estandarizadas y por medio de la retracción libre relacionarla con efectos de retracción por secado, retracción autógena, fisuración, agrietamiento y calor de hidratación; dicho método será utilizado como parte de la metodología de trabajo para determinar la influencia del tipo de cemento en la retracción libre. Como complemento experimental se utilizará como referencia el artículo ASTM C1581-18 que describe los procedimientos de medición de tensiones internas generadas por la retracción restringida en anillos de concreto y así produciendo una fisuración inducida, para la presente investigación se tomará el modelo geométrico del anillo y la medición será mediante observación directa con un comparador de fisuras.

Coaila & Loayza (2015) y Munizaga (2009) con investigaciones en Perú y Chile respectivamente, coinciden en la misma metodología experimental en sus investigaciones la medición de la retracción libre con lo indicado en el artículo ASTM C157-08 por 28 días y una inspección visual de la fisuración en anillos de concreto en el tiempo simulando una retracción restringida tomando como referencia el modelo indicado en el artículo ASTM C1581, realizado por el Comité ASTM C09 con revisión en el 2018, igualmente por 28 días. Debido a sus eficientes resultados para la relación de los resultados con la medición de la magnitud de retracción, será la metodología experimental que se utilizará de la misma forma para la presente investigación.

### 2.1.2 Variables

Hernández (2014) define que “la variable es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse” (p. 105). La cual adquiere valor en la investigación al relacionarse con las otras variables dependientes y/o independientes formulando una hipótesis o teoría (Hernández, 2014).

Debido a las diferentes causas de fisuración generadas por la influencia de distintos agentes tanto externos e internos, es necesario limitar el alcance de las variables en estudio, es por lo que el objeto de estudio de la presente investigación define como variable al tipo de cemento en el diseño de mezcla para determinar la magnitud de la fisuración por retracción generada por cada tipo de cemento utilizado.

### 2.1.3 Operacionalización de variables

Tabla 3  
Operacionalización de variable Independiente

Variable Independiente	Definición	Dimensión	Instrumento de medición	Rango
	<b>Definición conceptual</b>			
	Clasificación de un conglomerante (cemento) hidráulico en función a sus características químicas y físicas específicas para cumplir los requerimientos de diseño de los proyectos (Comité ACI 225, 2019)	Características específicas:	ASTM C150 para cementos puros Portland	Cemento Puro
Tipo de Cemento Portland	<b>Definición Operacional</b> Categorización del cemento portland bajo las normativas descritas por la ASTM en las metodologías C150, C595 o C1157 según su requerimiento, adiciones o performance respectivamente.	Resistencia inicial, Contenido de Puzolana (adición) y procedencia.	ASTM C595 para cementos adicionados ASTM C1157 para cementos por performance	Cemento Adicionado Cemento por performance

Elaboración propia

Tabla 4  
Operacionalización de variable dependiente

Variable Dependiente	Definición	Dimensión	Instrumento de medición	Rango
Fisuración por retracción	<b>Definición conceptual</b> Roturas o aberturas que aparecen en el concreto como consecuencia de tensiones superiores a su capacidad admisible a causa de cambios volumétricos (Toirac, 2004)	Ensayo de retracción libre detallado en la norma ASTM C157	Método cuantitativo de lectura de cambio longitudinal de especímenes de concreto tipo viga en el tiempo.	Alto Medio Bajo
	<b>Definición Operacional</b> Cuantificación y diagnóstico de la fisuración generada por los cambios volumétricos generados por la retracción de secado del concreto cuantificado por ensayos de retracción libre (ASTM C157) y retracción restringida (ASTM C1581)	Ensayo de retracción restringida con especímenes tipo anillo de concreto indicado en la norma ASTM C1581	Método cualitativo de inspección visual de la aparición de fisuras en el tiempo en los anillos de concreto, determinando su potencial de agrietamiento	Alta Moderada Alta Moderada baja Baja

Elaboración propia



#### 2.1.4 Tipo de estudio

La presente investigación es de tipo correlacional; es decir, “busca establecer la correlación entre dos o más variables” (Colomé, 2018, p. 13). La cual se basa en un enfoque cuantitativo de obtención, observación y análisis de resultados de ensayos experimentales en laboratorio y resultados calculados teóricamente mediante métodos indicados por la ASTM y ACI respectivamente.

#### 2.1.5 Diseño de investigación

El tipo de diseño de investigación es experimental basada en el efecto en magnitud de fisuración por retracción, en especímenes de laboratorio y resultados según modelo de cálculo, a causa del tipo del cemento del diseño de mezcla.

#### 2.1.6 Población, muestra y muestreo

*Población:*

Las causas de fisuración del concreto según lo indicado por el Comité ACI 224 (2007) listado en la *Tabla 5*.

Tabla 5

*Causas de fisuración según el ACI224*

<b>Estado del concreto</b>	<b>Causa de fisuración</b>
Estado plástico	Retracción plástica
	Precipitación de los agregados
Estado endurecido	Retracción
	Tensiones de origen térmico
	Reacciones químicas
	Meteorización
	Corrosión de las armaduras
	Prácticas constructivas inadecuadas
	Sobrecarga durante la construcción
	Errores de diseño y detallado
Cargas aplicadas externamente	

Tabla adaptada del ACI 224.1R-07 por el ACI Comité ACI 224 (2007)

### *Muestra*

La fisuración causada por la retracción en el concreto en estado endurecido influenciado por el tipo de cemento recomendados para canales hidráulicos subterráneos.

### *Muestreo*

Como muestreo se tendrán tres diseños de mezcla en donde únicamente varía el tipo de cemento, los cuales son el tipo I, Tipo HE y el Tipo IP que cumplen las normas técnicas NTP 334.009(ASTM C150), NTP 334.082(ASTM C1157) y NTP 334.090(ASTM C595) respectivamente. De cada diseño de mezcla se muestrearán lo siguiente:

- 03 vigas para la determinación de la magnitud de retracción libre según lo indicado por el Comité ASTM C09 (2017) en el método ASTM C157 - Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto.
- 01 anillo para la observación de la fisuración simulando retracción restringida según las dimensiones indicadas en el método ASTM C1581- Método estándar para determinar la edad de agrietamiento y las características de tensión de tracción inducida de mortero y concreto bajo retracción restringida.
- Determinación de los valores de retracción total según el modelo matemático indicado por el Comité ACI 209 (2008) en el informe ACI 209.2R - Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido.
- 04 probetas cilíndricas para realizar los ensayos de compresión según lo indicado por el ASTM Comité C09 (2020) en su método estándar ASTM C39 - Fuerza a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

#### 2.1.7 Justificación teórica y metodológica

Para la elección del tipo de cemento se debe considerar el efecto que podría tener su influencia con la fisuración por retracción en una estructura hidráulica de concreto, la presente investigación propone métodos de obtención y análisis de resultados de ensayos experimentales en laboratorio basados en la metodología

descrita en el ASTM C157 – “Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto” para la retracción libre, en la metodología modificada descrita en el ASTM C1581- “Método estándar para determinar la edad de agrietamiento y las características de tensión de tracción inducida de mortero y concreto bajo retracción restringida” para retracción restringida. El cálculo de la magnitud de retracción se realizará mediante modelos teóricos indicados en el ACI 209.2R - Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido.

### 2.1.8 Justificación práctica

En una estructura de conducción de fluidos como son los canales, es importante controlar la fisuración de la estructura para evitar posteriores reparaciones o retrabajos que implicarían un incremento del costo de proyecto; ya que al ser un canal, el fluido que conduce no debe tener contacto con sustancias ajenas a su composición natural que podrían alterar sus propiedades químicas o físicas perjudicando a los beneficiarios aguas abajo del canal pertenecientes a una población que espera el agua para irrigar sus cultivos. Es por ello la importancia de una evaluación a priori de los agentes influyentes en la fisuración como es el caso del tipo de cemento con la obtención y análisis de resultados mencionados.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

**Concreto:** Mezcla de cemento Portland o cualquier material cementicio hidráulico con agregado fino, agregado grueso y agua; pueden tener aditivos y/o adiciones para modificar sus propiedades (Comité ASTM C09, 2013, p. 3).

**Patología:** Etimológicamente proviene de las raíces griegas *phatos* y *logos*, que la define como el estudio de las enfermedades (Broto, 2006, pág. 6)

**Esfuerzo:** Fuerza aplicada en un área de un elemento para producir deformación mediante la generación de tensiones y según la dirección actuante pueden provocar compresión, tracción, torsión o corte.

**Fisura:** Abertura incontrolada de una estructura generada por esfuerzos de tensión que superan los esfuerzos admisibles de la estructura que según su magnitud de grosor y profundidad podrían generar daños estructurales que requieran una intervención (Toirac, 2004, p. 75).

**Túnel:** Obra subterránea que permite la comunicación entre dos puntos atravesando por un obstáculo como una montaña o un río, utilizando procedimientos de excavación y sostenimiento en toda su longitud.

**Canal hidráulico:** Estructura que permite la conducción de algún fluido de forma direccionada y por acción de fuerzas gravitacionales entre dos puntos que tienen distintas cotas de elevación (León, 2015, pág. 54)

**Retracción autógena:** Retracción que genera la disminución de volumen por la ausencia de humedad perdida debido a las reacciones de hidratación del agua con el cemento que se combinan químicamente (Comité ACI 209, 2008).

**Retracción por secado:** Retracción generada por la pérdida de agua mediante la evaporación contenida en los poros y capilares de la estructura de concreto (Giani, Navarrete, & Bustos, 2008).

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

### 3.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se basa principalmente en un método hipotético-deductivo que consiste en definir, establecer, validar y verificar hipótesis a partir de la observación, medición y análisis de una cantidad limitada de un fenómeno (Colomé, 2018, p. 9). Colomé (2018) representa el proceso del método como se muestra en la Figura 3.

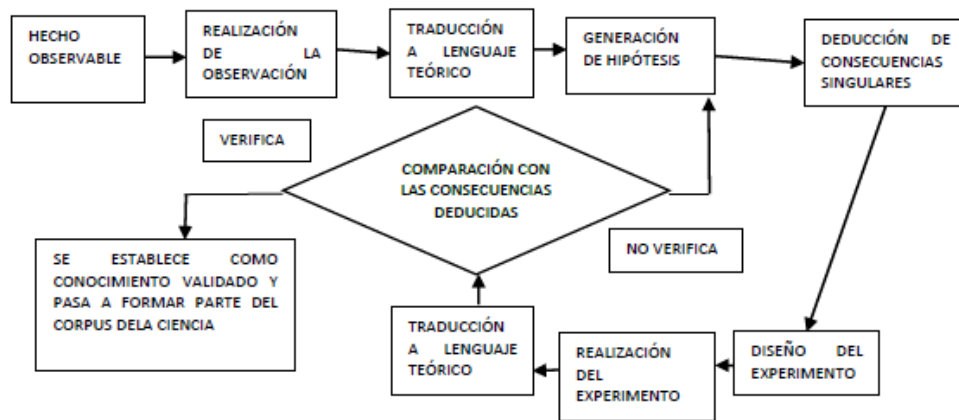


Figura 3 Diagrama de flujo del método hipotético-deductivo.  
Fuente: Colomé (2018)

En la presente investigación se parte de la búsqueda de las causas de fisuración de canales hidráulicos de concreto, la elección de una de ellas como es el caso de la influencia del tipo de cemento, para luego plantear una hipótesis y finalmente realizar los ensayos experimentales y teóricos correspondientes para la verificación y contrastación de la hipótesis planteada (Hernández, 2014).

### 3.2 METODOLOGÍA

Para la determinación de la influencia del tipo de cemento en la fisuración en canales hidráulicos subterráneos se ha propuesto el empleo de ensayos normados por la ASTM y modelos matemáticos indicados por el ACI, en los cuales se obtienen datos de retracción tanto en condición de deformación libre y restringida.

### 3.2.1 Ensayo de retracción libre

#### *Descripción*

El ensayo experimental se basa en lo descrito por el Comité ASTM C09 (2017), en el método estándar de ensayo ASTM C157 – “Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto” en el cual se determina el cambio de longitud causado por agentes externos o internos en especímenes de mortero o concreto realizados en laboratorio y expuestos a condiciones controladas de temperatura y humedad (Comité ASTM C09, 2017).

El ensayo consiste en la medición del cambio de longitud de viguetas de concreto con dimensiones establecidas en el método ASTM C157, las vigas son elaboradas con moldes metálicos como se muestra en la Figura 4, para el caso de muestras de concreto se requieren elaborar vigas con base cuadrangular de 50 mm (5 cm) de lado y de 285 mm (28.5 cm) de largo, las cuales estarán con un tornillo embebido en cada extremo que se utilizarán para fijar la vigueta en el instrumento de medición de longitud.

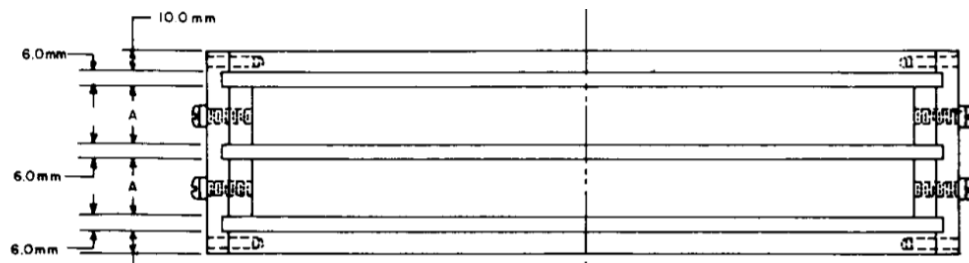


Figura 4 Molde metálico para especímenes tipo viga con orificio para tornillo  
Fuente: ASTM C490 - Comité ASTM C01 (2007)

El método estándar de ensayo ASTM C157 indica que por cada diseño de mezcla se deben realizar 3 especímenes elaborados bajo el mismo estándar y almacenados en condiciones idénticas.

Los especímenes se desmoldearon al día siguiente de haber colocado el concreto en los moldes metálicos y se llevaron a la cámara de curado del LEM de la UNI con una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y una humedad relativa de  $90 \pm 5\%$  y permanecieron en la cámara de curado por 28 días, tiempo que duró el ensayo, sólo se retiraron las vigas de la cámara para hacer la medición de longitud.

### *Instrumento de medición*

El método utilizado para la medición de los especímenes tipo viga tuvo un enfoque cuantitativo debido a que se realizaron las medidas con un instrumento calibrado y que cumplía con el método ASTM C490 – “Uso de aparatos para la determinación del cambio de longitud de pasta de cemento endurecido, mortero y concreto” como se muestra en la Figura 5.



*Figura 5 Aparato de medición de cambio de longitud*  
Fuente: Elaboración propia

Las lecturas se realizaron a los 4, 7, 14, 21 y 28 días de haberse desmoldado las vigas, con una precisión de  $\pm 0.001$  mm con ayuda de los tornillos embebidos en la viga y el aparato medidor de cambio de longitud (Comité ASTM C09, 2017).

Para el inicio de la medición de una viga se calibró el instrumento medidor de longitud con una barra referencia como se muestra en la Figura 6, luego por cada medición de longitud de cada viga se registraron 4 lecturas en rotando de una manera suave axialmente  $90^\circ$  como se muestra en la Figura 7 tal como se indica en la norma (ASTM C490 - Uso de aparatos para la determinación del cambio de longitud de pasta de cemento endurecido, mortero y concreto).



Figura 6 Barra de referencia en el equipo medidor de longitud  
Fuente: Elaboración propia



Figura 7 Lectura de longitud de viga  
Fuente: Elaboración Propia

### *Método de análisis de datos*

Debido a que el ensayo tiene un enfoque experimental cronológico; es decir, se realizan las mediciones continuas sobre una variable durante un tiempo determinado (Hernández, 2014). Es necesario procesar la recolección de los datos en una tabla de doble entrada donde se indica las 4 lecturas en longitud, donde cada lectura se toma a la muestra rotada 90° hasta completar la vuelta de 360°, el otro dato de ingreso es la edad relativa de la muestra cuando se realizaron las lecturas. Para determinar la variación en longitud de la muestra se empleará la Ecuación 1.

$$\Delta L_t = \frac{L_t - L_o}{G} \times 100$$

Ecuación 1



Donde:

$\Delta L_t$  : Variación porcentual en longitud de la muestra a la edad "t" (%)

$L_t$  : Lectura de longitud en el comparador en la edad "t" (mm)

$L_o$  : Lectura inicial de longitud en el comparador en el primer día (mm)

$G$  : Longitud de la barra de referencia y de la muestra, 250mm

### 3.2.2 Ensayo de retracción restringida

#### Descripción

El ensayo experimental se basó en la observación de la fisuración en el tiempo en anillos de concreto simulando condiciones de retracción restringida. Los anillos se elaboraron en moldes con las dimensiones indicadas por el Comité ASTM C09 (2018) en la norma ASTM C1581- "Método estándar para determinar la edad de agrietamiento y las características de tensión de tracción inducida de mortero y concreto bajo retracción restringida" como se muestra en la Figura 8.

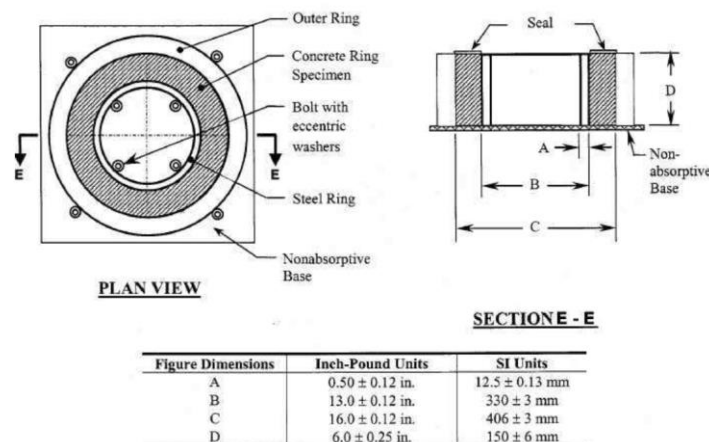


Figura 8 Dimensiones del anillo para la inspección visual de la fisuración por retracción restringida  
Fuente: ASTM C1581- Método estándar para determinar la edad de agrietamiento y las características de tensión de tracción inducida de mortero y concreto bajo retracción restringida

La fisuración es generada por las tensiones de compresión desarrolladas por el anillo de concreto sobre el anillo interior de acero donde estas tensiones son causadas por la retracción, las cuales al superar la capacidad tensional admisible del concreto provoca el agrietamiento evidenciado en la superficie del anillo de concreto (Comité ASTM C09, 2018).

Se elaboró un anillo de concreto por cada tanda de mezcla, según tipo de cemento en estudio. Los especímenes de cada diseño se elaboraron bajo el mismo estándar y almacenados en condiciones idénticas.

Los especímenes se desmoldearon al día siguiente de haber colocado el concreto en los moldes metálicos como se muestra en la Figura 9 y se llevaron a la cámara de curado del LEM de la UNI con una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y una humedad relativa de  $90 \pm 5\%$  tal como se muestra en la Figura 10 y permanecieron en la cámara de curado por 28 días, tiempo que duró el ensayo de observación, sólo se retiraron los anillos de la cámara para hacer la observación y medición de las fisuras generadas en el anillo.



Figura 9 Desencofrado de anillos de concreto  
Fuente: Propia



Figura 10 Anillos de concreto en la cámara de curado del LEM UNI  
Fuente: Elaboración Propia

### Instrumento de medición

Como instrumento de observación cualitativa se utilizará una regla de fisuras de 0.1 mm de precisión como se muestra en la Figura 11 con el cual se tomará registro desde la aparición de las fisuras de un ancho mínimo de 0.05mm en el anillo de concreto y se le hará seguimiento cada día la evolución y ensanchamiento de la fisura en el tiempo hasta los 28 días de desmoldeado el espécimen.

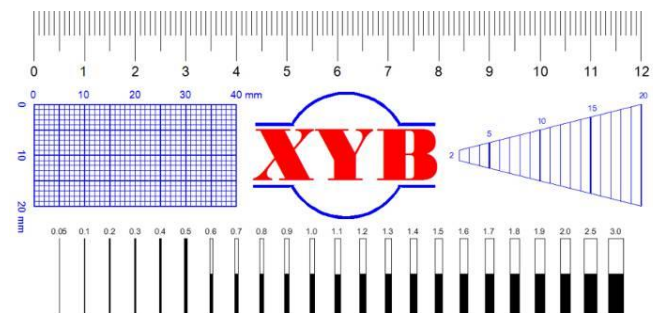


Figura 11 Regla de Fisuras  
Fuente: Ycaza, 2011

Los anillos de concreto se retirarán de la cámara de curado para realizar las mediciones de las fisuras luego de limpiar su superficie para dar mayor claridad de la lectura con la regla de fisuras como se muestra en la Figura 12. Cada fisura identificada se numeró y se le realizó el seguimiento de evolución desde su aparición hasta los 28 días de edad del anillo de concreto.



Figura 12 Medición de fisura en anillo de concreto  
Fuente: Elaboración propia

### *Método de análisis de datos*

Se observó cualitativamente la aparición de fisuras en el anillo de concreto, indicando la edad de aparición, posterior a ello el seguimiento de la evolución y ensanchamiento de la fisura en el tiempo medidos con una regla de fisuras, los datos obtenidos se colocaron en una tabla y se generaron curvas de tendencia de fisuración a nivel cualitativo en cantidad y evolución de la fisuración en el anillo; estos datos complementaron el análisis para determinar la magnitud de influencia del tipo de cemento en la fisuración en un elemento de concreto (Coaila & Loayza, 2015).

Como parte de la identificación de la potencialidad de la fisuración de la influencia del tipo de cemento, se tomó como indicador la edad en la que se produce la primera fisuración y con los rangos indicados por la (INACAL, 2016, p. 18) en la norma (NTP 339.212.2016 - Método de ensayo estándar para determinar la edad del agrietamiento y características del esfuerzo de tensión inducida del mortero y concreto bajo contracción moderada) mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6  
 Clasificación potencial por agrietamiento

<b>Tiempo neto en el agrietamiento, tcr días</b>	<b>Potencial de agrietamiento</b>
0<tcr≤7	Alta
7<tcr14	Moderada alta
14<tcr≤28	Moderada baja
tcr>28	Baja

Tabla adaptada de NTP 339.212.2016 – “Método de ensayo estándar para determinar la edad del agrietamiento y características del esfuerzo de tensión inducida del mortero y concreto bajo contracción moderada” por INACAL (2016).

### 3.2.3 Elaboración y ensayos de compresión de muestras cilíndricas de concreto

#### *Descripción*

Para cuantificar y verificar la resistencia a la compresión de los diseños de mezcla elaborados para la experimentación de los ensayos de retracción libre y restringida antes mencionados se elaboraron 04 probetas cilíndricas de 100mm de diámetro y 200mm de altura, como se muestra en la Figura 13, con los

procedimientos estandarizados de preparación de materiales, mezcla y fabricación del concreto y curado de especímenes en condiciones de laboratorio indicados por el Comité ASTM C09 (2019) en el método ASTM C192 - Práctica estándar para elaborar y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio. Para luego realizar los ensayos de compresión a los 7 y 28 días de haber elaborado las muestras con los procedimientos estandarizados de ensayos indicados por el Comité ASTM C09 (2020) en el método ASTM C39 - Fuerza a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.



Figura 13 Probetas cilíndricas del diseño con cemento HE. Fuente: Elaboración propia

#### *Instrumento de medición*

Para determinar la magnitud de la resistencia a la compresión de los diseños de mezcla se utilizó una máquina de ensayo a la compresión ubicada en el Laboratorio de ensayo de materiales de la UNI, la cual ejerce una carga continua y sin producción de choques sobre las probetas cilíndricas como lo indica el método ASTM C39 – “Fuerza a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto” como se muestra en la Figura 14.



Figura 14 Equipo de ensayo a compresión de probetas cilíndricas  
Fuente: Elaboración Propia

### *Método de análisis de datos*

De cada mezcla de concreto se elaboraron 04 probetas cilíndricas de las cuales 02 de ellas se le realizaron el ensayo a la compresión a los 7 días de haberse elaborado las probetas y los otros 02 restantes a los 28 días. De ambos ensayos se obtiene una media  $f'c$  que determina si el diseño de mezcla llega a la resistencia de diseño que es de  $450 \text{ kg/cm}^2$  O su equivalente en pascales 45 Mpa.

El resultado obtenido de la máquina de ensayo de compresión es la fuerza máxima que resiste la probeta cilíndrica antes de su rotura, esta fuerza figura en su pantalla digital con unidad de medidas kilogramos fuerza como se muestra en la Figura 15. Para determinar la resistencia a la compresión de la probeta, el resultado obtenido de la máquina de ensayo se divide entre el área promedio de la sección de la probeta en centímetros cuadrados " $\text{cm}^2$ " obteniendo como resultado una magnitud de " $\text{kg/cm}^2$ " que se comparará con los resultados de las otras probetas ensayadas en un cuadro elaborado con datos de ingreso Tipo de cemento, día de ensayo y resistencia a la compresión obtenida.



Figura 15 Pantalla digital de la máquina de ensayos a compresión LEM-UNI  
Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4 Modelo matemático de retracción

#### *Descripción*

Es importante buscar un modelo matemático que determine la magnitud de retracción en el tiempo para poder contrastar lo obtenido experimentalmente con los ensayos ya descritos anteriormente. Por ello para complementar la investigación se utilizó uno de los modelos matemáticos descritos por el Comité ACI 209 (2008) en la guía ACI 209.2R - Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido.

El alcance la guía ACI 209.2R – “Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido” es desarrollar y proponer modelos matemáticos para la predicción de la retracción y fluencia en el concreto endurecido durante un tiempo definido por el investigador.

Los modelos matemáticos propuestos por el Comité ACI 209 (2008) se han realizado en base a la recolección de datos de retracción y fluencia de diferentes diseños de mezclas en todo el mundo tomando en cuenta diferentes factores como el tipo y contenido de cemento, la relación agua/cemento, el  $f'c$  de diseño, la humedad relativa del ambiente de curado y forma volumétrica de espécimen de análisis, luego de ser procesados estos datos se obtuvieron los modelos matemáticos propuestos.

#### *Instrumento de medición*

Para determinar el modelo matemático que aplica para el diseño de mezcla propuesto es necesario definir los parámetros de este y trazarlos como variables de entrada en la Tabla 7. Según el diseño de mezcla de referencia, el  $f'c$  de diseño de 45 Mpa, las condiciones de curado y el tipo de cemento que para fines prácticos de la elección del modelo matemático se considera al cemento tipo IP y HE como los cementos tipo I y III respectivamente por sus comportamientos similares, teniendo como resultado la elección del modelo matemático CEB MC90-99.

Tabla 7  
Rango de parámetros por modelo matemático

Variables de entrada	ACI 209R-92	Bažant-Baweja B3	CEB MC90	CEB MC90-99	GL2000
$f_{cm28}$ , MPa (psi)	—	17 - 70 (2500 - 10,000)	20 - 90 (2900 - 13,000)	15 - 120 (2175 - 17,400)	16 - 82 (2320 - 11,900)
Peso de agregado/Peso de cemento	—	2.5 - 13.5	—	—	—
Contenido de cemento, kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> )	279 - 446 (470 - 752)	160 - 720 (270 - 1215)	—	—	—
$a/c$	—	De 0.35 a 0.85	—	—	De 0.40 a 0.60
Humedad Relativa, %	De 40 a 100	De 40 a 100	De 40 a 100	De 40 a 100	De 20 a 100
Tipo de Cemento, (U.S.)	(I or III)	(I, II, III)	(I, II, III)	(I, II, III)	(I, II, III)
$t_c$ (curado húmedo)	≥ 1 día	≥ 1 día	< 14 días	< 14 días	≥ 1 día
$t_c$ (curado al vapor)	1 - 3 días	—	—	—	—
$t_o$ (Edad de carga del concreto)	≥ 7 días	$t_o \geq t_c$	> 1 día	> 1 día	$t_o \geq t_c \geq 1$ día

Tabla extraída de la guía ACI 209.2R - Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido

#### Método de análisis de datos

El modelo matemático CEB MC90-99 definido por Müller (1993) tiene la particularidad frente a los otros modelos matemáticos indicados en la Tabla 7 que puede separar la retracción en dos componentes, retracción autógena y retracción por secado, dando así un análisis más completo de la retracción (Comité ACI 209, 2008). Facilitando la comparación de los resultados de los ensayos experimentales ya que con estos se obtienen también la magnitud de la retracción.

Según el Comité ACI 209 (2008) el modelo matemático requiere los siguientes datos de ingreso:

- Edad en la que inicia la retracción; es decir, cuando culmina el curado húmedo.



- Edad cuando se le ejerce la carga al espécimen, este dato es necesario para calcular la retracción autógena la cual no es alcance de esta investigación.
- F'c de diseño, 45 Mpa.
- Humedad relativa expresada en decimales
- Tipo de Cemento
- Ratio de volumen/superficie, expresado en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>

Según el Comité ACI 209 (2008) para el modelo CEB MC90-99 la retracción por secado  $\varepsilon_{cdso}(t, t_c)$  es obtenida con la siguiente expresión:

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

*Ecuación 2*

Donde:

$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$ : Coeficiente teórico de retracción por secado en mm/mm (Ecuación 3)

$\beta_{RH}(h)$  : Coeficiente de corrección del efecto de la humedad relativa en la retracción por secado. (Ecuación 4)

$\beta_{ds}(t - t_c)$  : Función del desarrollo de la retracción por secado en el tiempo.

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

*Ecuación 3*

Donde:

$\alpha_{ds1}$  : Coeficiente de corrección por efecto del tipo de cemento según Tabla 8 Tabla 8

$\alpha_{ds2}$  : Coeficiente de corrección por efecto del tipo de cemento según Tabla 8

$f_{cm28}$  : Resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (Mpa)

$f_{cmo}$  : 10 MPa (Valor definido por el modelo CEB MC90-99)

Tabla 8  
 Tabla de coeficientes según tipo de cemento del modelo CEB MC90-99

Tipo de Cemento	$\alpha_{as}$	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
SL (Cemento de fraguado lento)	800	3	0.13
N o R (Cemento de Fraguado normal)	700	4	0.12
RS (Cemento de Fraguado rápido y de alta resistencia)	600	6	0.12

Tabla extraída de la guía ACI 209.2R - Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido

$$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[ 1 - \left( \frac{h}{h_o} \right)^3 \right] \text{ para } 0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1} \vee \beta_{RH}(h) = 0.25 \text{ para } h \geq 0.99\beta_{s1}$$

Ecuación 4

Donde:

$h$  : Humedad relativa en decimales

$h_o$  : 1 (Valor definido por el modelo CEB MC90-99)

$\beta_{s1}$  : Coeficiente basado en la autodesecación en el concreto de alto performance (Ecuación 6)

$$\beta_{ds}(t - t_c) = \left[ \frac{(t - t_c) / t_1}{350[(V/S) / (V/S)_o]^2 + (t - t_c) / t_1} \right]^{0.5}$$

Ecuación 5

Donde:

$V/S$  : Ratio volumen - superficie de la muestra en  $\text{mm}^3/\text{mm}^2 \leftrightarrow \text{mm}$

$(V/S)_o$  : 50mm (Valor definido por el modelo CEB MC90-99)

$(t - t_c)$  : Duración de la retracción (días)

$$\beta_{s1} = \left( \frac{3.5f_{cm0}}{f_{cm28}} \right)^{0.1} \leq 1.0$$

Ecuación 6

Según el Comité ACI 209 (2008) para el modelo CEB MC90-99 la retracción autógena  $\varepsilon_{cas}(t)$  es obtenida con la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{cas} = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t)$$

*Ecuación 7*

Donde:

$\varepsilon_{caso}(f_{cm28})$ : Coeficiente nocional de retracción autógena (Ecuación 8)

$\beta_{as}(t)$  : Función que describe el desarrollo de la retracción autógena en el tiempo (Ecuación 9)

$$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm28}/f_{cm0}}{6 + f_{cm28}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \times 10^{-6}$$

*Ecuación 8*

Donde:

$\alpha_{as}$  : Coeficiente que depende del tipo de cemento según Tabla 8

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp \left[ -0.2 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{0.5} \right]$$

*Ecuación 9*

Según el Comité ACI 209 (2008) para el modelo CEB MC90-99 la retracción total  $\varepsilon_{sh}(t, t_c)$  es obtenida con la sumatoria de la retracción por secado y la retracción autógena según la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c)$$

*Ecuación 10*

### 3.2.5 Diseño de mezcla

#### *Introducción*

Para la presente investigación se tomó como referencia el diseño de mezcla de un proyecto de obras civiles de un túnel de desvío de río en una mina ubicada en la región de Moquegua, el cual tiene las características de resistencia, impermeabilidad y no reacción a las aguas de infiltración del túnel. Se utilizó para el diseño patrón o de control el cemento tipo I, con una resistencia a la compresión

(f'c) de diseño de 45 Mpa, una relación a/c de 0.36, asentamiento (slump) de 6"–8", microsílce y aditivos como superplastificante y reductor de agua.

### *Tipo de Cemento*

La investigación enfoca su estudio en la influencia del tipo de cemento con la fisuración de un canal de concreto, es por lo que se tuvo como única variable del diseño de mezcla a los diferentes tipos de cemento que se muestran en la Tabla 9, los cuales son elaborados en el Perú.

Tabla 9  
 Tipos de cemento empleados en la investigación

<b>Clase de Cemento / Norma Técnica</b>	<b>Tipo de Cemento</b>	<b>Características</b>
Cementos Portland / NTP 334.009 – ASTM C150	I	De uso general
Cementos Portland Adicionados / NTP 334.090 – ASTM C595	IP	Cemento con 15%-40% de puzolana
Cementos Portland de Performance / NTP 334.082 – ASTM C1157	HE	Alta resistencia inicial

Tabla adaptada de "Las normas técnicas de cemento y concreto en el Perú" por Avalo (2016)

### *Agregado Fino*

El agregado fino utilizado para la elaboración del diseño de mezcla y especímenes de laboratorio es arena gruesa proveniente de la cantera Villa el Salvador. En base a los ensayos de propiedades físicas realizados en el LEM de la UNI se obtuvo los datos mostrados en la Tabla 10 y de los ensayos de análisis granulométricos mostrados en la Tabla 11 se generó la curva granulométrica como se muestra en la Figura 16.

Tabla 10  
 Propiedades físicas del agregado fino

PROPIEDADES FÍSICAS	VALOR
Módulo de Fineza	3.40
Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1584
Peso Unitario Compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1748
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	2.61
Contenido de Humedad (%)	2.59
Porcentaje de Absorción (%)	1.19

Elaboración Propia

Tabla 11  
 Análisis Granulométrico del agregado fino

TAMIZ (Malla / mm)	% RET.	% RET. ACUM.	% PASA	% PASA. ASTM C 33 HUSO AGR. FINO
3/8"	9.50	0.0	100.0	100
N°4	4.75	8.9	91.1	95 - 100
N°8	2.36	22.8	68.3	80 - 100
N°16	1.18	21.7	53.5	50 - 85
N°30	0.60	16.2	69.7	25 - 60
N°50	0.30	13.4	83.1	5 - 30
N°100	0.15	9.9	93.0	0 - 10
FONDO	7.0	100.0	0.0	

Elaboración Propia

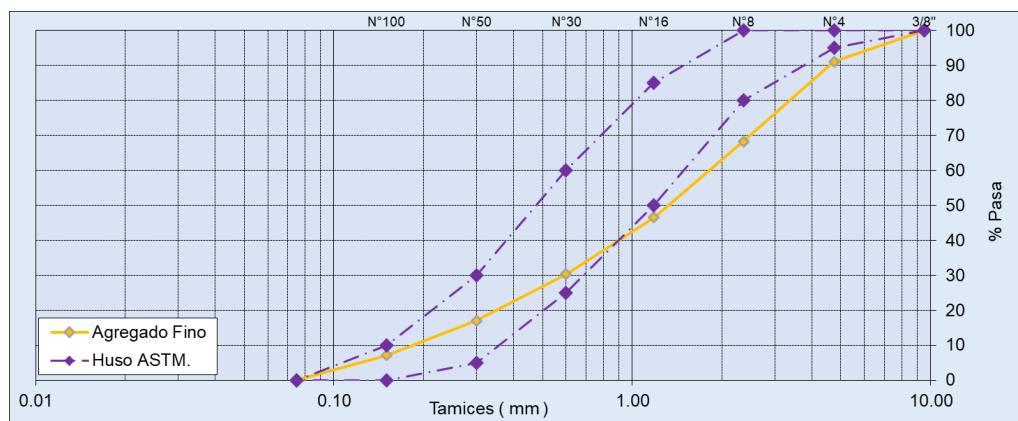


Figura 16 Huso granulométrico del Agregado Fino  
 Fuente: Elaboración propia

### Agregado Grueso

El agregado grueso utilizado para la elaboración del diseño de mezcla y de los especímenes de laboratorio es piedra chancada proveniente de la cantera Petramax. En base a los ensayos de propiedades físicas realizados en el LEM de la UNI se obtuvo los datos mostrados en la Tabla 10 y de los ensayos de análisis granulométricos mostrados en la Tabla 11 se generó la curva granulométrica como se muestra en la Figura 17.

Tabla 12  
Propiedades físicas del agregado grueso

PROPIEDADES FÍSICAS	VALOR
Módulo de Fineza	3.40
Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1584
Peso Unitario Compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1748
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	2.61
Contenido de Humedad (%)	2.59
Porcentaje de Absorción (%)	1.19

Elaboración propia

Tabla 13  
Análisis granulométrico del agregado grueso

TAMIZ (Malla / mm)	% RET.	% RET. ACUM.	% PASA	% PASA. ASTM C 33 HUSO AGR. FINO
3/8"	9.50	0.0	0.0	100.0
Nº4	4.75	8.9	8.9	91.1
Nº8	2.36	22.8	31.8	68.3
Nº16	1.18	21.7	53.5	46.6
Nº30	0.60	16.2	69.7	30.3
Nº50	0.30	13.4	83.1	17.0
Nº100	0.15	9.9	93.0	7.0
FONDO		7.0	100.0	0.0

Elaboración propia

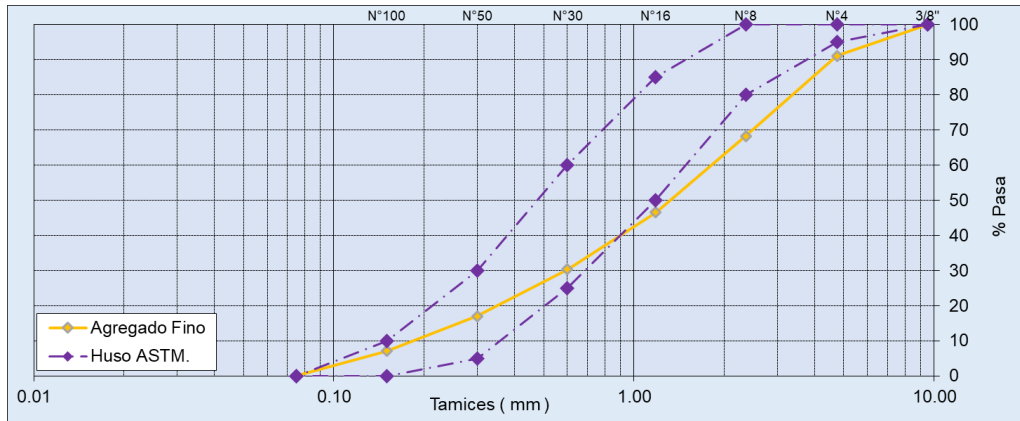


Figura 17 Huso granulométrico del Agregado Grueso  
 Fuente: Elaboración propia

### Aditivos y adición en el diseño de mezcla

En base al diseño de mezcla de referencia de un canal subterráneo de concreto se utilizaron los mismos aditivos y adición para la elaboración del diseño de mezcla de control.

Debido a que el canal subterráneo de concreto tenía muros laterales con un ancho variable de 0.20m a 1.00m y alturas mayores a 1.50m, lo conveniente era que el concreto se comporte lo más fluido posible, además de no generar segregación a la hora de verter el concreto entre el encofrado y el hastial del túnel. Por tal motivo el aditivo empleado fue el superplastificante de alto desempeño denominado Neoplast 8500 HP el cual brinda la capacidad de trabajabilidad del concreto para relaciones agua/cemento muy bajas, además de reducir la segregación y exudación en el concreto plástico (QSI Perú S.A, 2016).

Otra propiedad que debe tener la mezcla del concreto para un canal subterráneo es procurar el mayor tiempo para que el concreto se mantenga en estado plástico sin llegar a la primera fragua debido a que las distancias desde el punto donde se fabrica el concreto hasta el frente de trabajo dentro en un túnel son muy largas, además las velocidades de los camiones hormigoneros dentro de un túnel son bajas y controladas teniendo tiempos de hasta 4 horas desde la fabricación de concreto hasta el vaciado de este el cual es realizado con una bomba estacionaria de concreto. Es por ello que el aditivo que se empleó para adquirir esta propiedad es el retardante de fragua para plasticidad prolongada

denominado EUCO WR-75 el cual brinda la capacidad de transportar la mezcla de concreto por largas distancias y así facilitando el bombeo (QSI Perú S.A, 2019).

Al construir un canal subterráneo de concreto es inevitable que las losas y los muros no estén en contacto directo con las paredes del túnel excavado, lo que podría generar que las aguas de infiltración del mismo túnel puedan infiltrarse también en los muros y hastiales del canal y así tener contacto con el fluido que transporta este pudiendo generar problemas ambientales y sociales. En consecuencia, el diseño de referencia considera la utilización de la adición a base de microsílíce es el SikaFume la cual al ser utilizada en la mezcla de concreto “reduce la porosidad y generando una estructura densa y resistente al ataque de aguas y ambientes agresivos” (Sika, 2020, p. 1). Otra propiedad que brinda la adición de microsílíce en la mezcla de concreto es que “mejora la aptitud para el bombeo de la mezcla de concreto” (Sika, 2020, p. 1).

#### *Diseño de mezcla patrón o de control*

Para la elaboración del diseño mezcla patrón o de control con cemento tipo I se tomó como referencia los parámetros solicitados para el diseño de mezcla de un canal subterráneo, ver Tabla 14.

Tabla 14  
Parámetros de diseño de mezcla de un canal de concreto subterráneo

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Relación a/c	0.36
F’c de diseño (Mpa)	45
Porcentaje Microsílíce (%)	5.00
Porcentaje Aditivo Neoplast 8500HP o similar (%)	0.85
Porcentaje Aditivo Euco WR75 o similar (%)	0.35
Porcentaje de aire atrapado (%)	1
Slump (Pulgadas)	6” – 8”

Tabla extraída de un informe de diseño de un proyecto de obras civiles de un túnel de desvío de río en una mina ubicada en la región de Moquegua.

A partir de los parámetros de diseño de referencia de la Tabla 14 y las características de los agregados analizados en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la UNI se procedió a elaborar el diseño de mezcla, obteniendo el



diseño de mezcla patrón con una relación a/c de 0.42 con las proporciones indicadas en la Tabla 15.

Tabla 15  
 Diseño de mezcla de control

Material	Diseño Seco (Kg)	Diseño Húmedo (Kg)
Cemento Tipo I	437.64	437.64
Agua	193.00	183.82
Arena	792.70	813.20
Piedra	811.20	816.10
Superplastificante NEOPLAST 8500 HP	8.75	8.75
Retardante de fragua EUCO WR-75	1.31	1.31
Microsílice SikaFume	21.88	21.88

Elaboración propia

### 3.2.6 Elaboración de muestras para ensayo

A partir del diseño de mezcla de control se utilizó al tipo de cemento como única variable para la elaboración de los otros dos diseños de mezcla, obteniendo 3 de diseño de mezcla identificados con los cementos tipo I, tipo IP y tipo HE cada diseño.

#### *Cantidad y tipos de muestras*

Según requerimiento de los ensayos experimentales anteriormente mencionados por cada diseño de mezcla, se estimó que cada diseño de mezcla tiene los siguientes tipos y cantidades de muestras:

- Tres vigas rectangulares de base cuadrangular de 50mm de lado y con un largo de 285mm según lo indicado en el ASTM C157 - Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto.
- Un anillo con diámetro exterior de 406mm, diámetro interior de 330mm y altura de 150mm según lo indicado en el ASTM C1581- Método estándar para determinar la edad de agrietamiento y las características de tensión de tracción inducida de mortero y concreto bajo retracción restringida.

- Cuatro probetas cilíndricas de 100mm de diámetro y 200mm de altura según lo indicado en el ASTM C192 - Práctica estándar para elaborar y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio.

#### *Estimación de tamaño de tanda*

Para la estimación de la tanda se calculó el volumen de las muestras requeridas por cada diseño de mezcla y considerando un desperdicio de 50% que podría quedarse en el mezclador tipo trompo, en la carretilla y al realizar el ensayo de asentamiento, obteniéndose una tanda de 0.03 m<sup>3</sup> tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16  
 Estimación del volumen de la tanda por diseño de mezcla

Muestra	Base/ Diámetro Exterior (m)	Altura (m)	Largo (m)	Vol. (m <sup>3</sup> )	Cant. (und)	Vol. total
Viga	0.050	0.050	0.285	0.001	3	0.003
Anillo	0.406	0.150		0.007	1	0.007
Probetas cilíndricas	0.100		0.200	0.008	4	0.006
					<b>Subtotal</b>	<b>0.02 m<sup>3</sup></b>
				50% Desperdicio		0.01 m <sup>3</sup>
					<b>Total</b>	<b>0.03 m<sup>3</sup></b>

Elaboración propia

La dosificación de la tanda se obtuvo con lo indicado en el diseño de mezcla control mostrado en la Tabla 15 y el volumen obtenido en la estimación de la tanda por diseño de mezcla indicado en la Tabla 16 que resulta de 0.03 m<sup>3</sup> por tanda, obteniéndose la dosificación por tanda tal como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17  
 Dosificación de tanda de muestreo

<b>Material</b>	<b>Diseño Húmedo (kg)</b>	<b>Dosificación de tanda</b>	<b>Und</b>
Cemento (Tipo I, IP ó HE)	437.64	13.13	Kg
Agua	183.82	5.51	Lt
Arena	813.20	24.40	Kg
Piedra	816.10	24.48	Kg
Superplastificante NEOPLAST 8500 HP	8.75	262.59	g
Retardante de fragua EUCO WR-75	1.31	39.39	g
Microsílice SikaFume	21.88	656.46	g

Elaboración Propia

#### *Elaboración de mezcla y muestras de concreto*

Para la elaboración de la mezcla de concreto, muestreo, moldeo y curado de especímenes se utilizó el método normalizado indicado en el ASTM C192M – “Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio” donde se describe los pasos a seguir para la correcta elaboración de especímenes de muestreo de cada diseño de concreto.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

### 4.1 Ensayo de Retracción Libre

#### 4.1.1 Resultados del ensayo de Retracción Libre por diseño

##### *Diseño Patrón*

En la Tabla 18 se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de retracción libre para el Diseño patrón que corresponde al cemento tipo I, donde se indica la lectura promedio de las 4 lecturas realizadas con el comparador de longitud por edad de cada vigueta graficado en la Figura 18.

Tabla 18  
Resultados del ensayo de Retracción Libre para el diseño patrón con cemento tipo I

Muestra	Edad	Lectura prom. (mm)	Variación (mm)	Retracción Libre (%)
M-1	0	9.624	-	0.0000%
M-1	4	9.545	0.0790	0.0316%
M-1	7	9.568	0.0560	0.0224%
M-1	14	9.516	0.1080	0.0432%
M-1	21	9.488	0.1358	0.0543%
M-1	28	9.473	0.1501	0.0600%
M-2	0	9.886	-	0.0000%
M-2	4	9.850	0.0360	0.0144%
M-2	7	9.862	0.0240	0.0096%
M-2	14	9.817	0.0690	0.0276%
M-2	21	9.785	0.1005	0.0402%
M-2	28	9.770	0.1151	0.0460%
M-3	0	8.772	-	0.0000%
M-3	4	8.728	0.0440	0.0176%
M-3	7	8.747	0.0250	0.0100%
M-3	14	8.686	0.0855	0.0342%
M-3	21	8.622	0.1500	0.0600%
M-3	28	8.615	0.1568	0.0627%

Elaboración propia

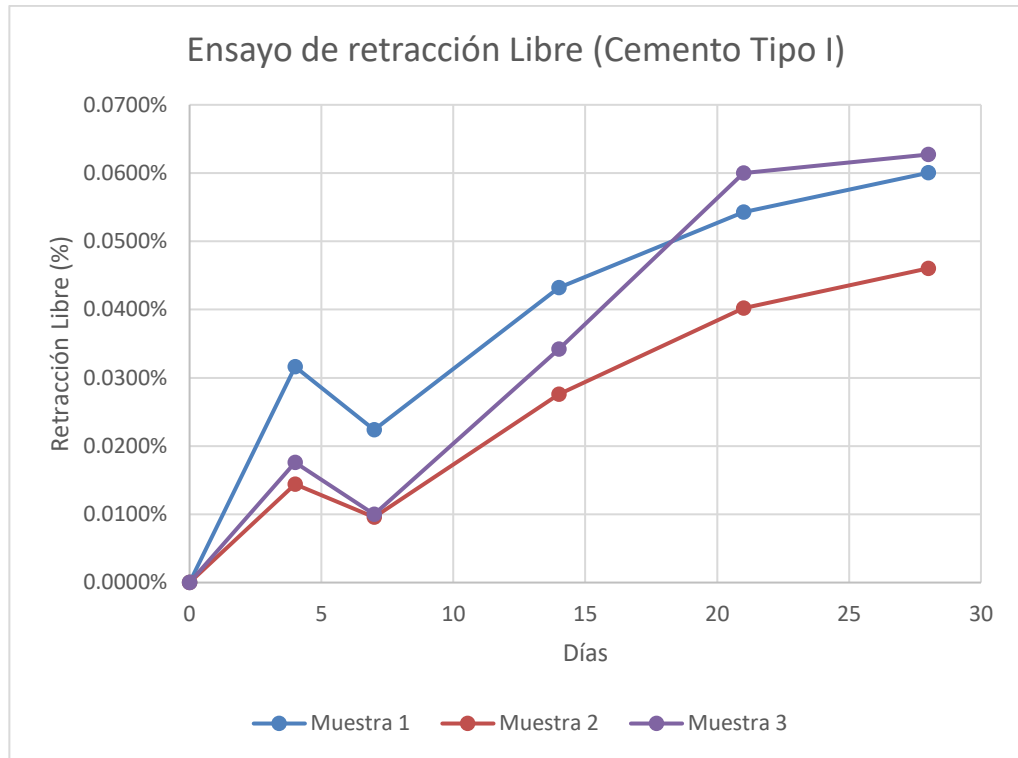


Figura 18 Gráfica de los resultados del ensayo de retracción libre para el diseño con cemento tipo I  
 Fuente: Elaboración propia

Del promedio de los datos presentados en la Tabla 18 se obtiene la Tabla 19 la cual se representa en la Figura 19.

Tabla 19  
 Variación promedio de la retracción libre en longitud del diseño patrón

Diseño	Edad	Retracción Libre promedio (%)
Patrón	0	0.0000%
Patrón	4	0.0212%
Patrón	7	0.0140%
Patrón	14	0.0350%
Patrón	21	0.0515%
Patrón	28	0.0563%

Elaboración propia

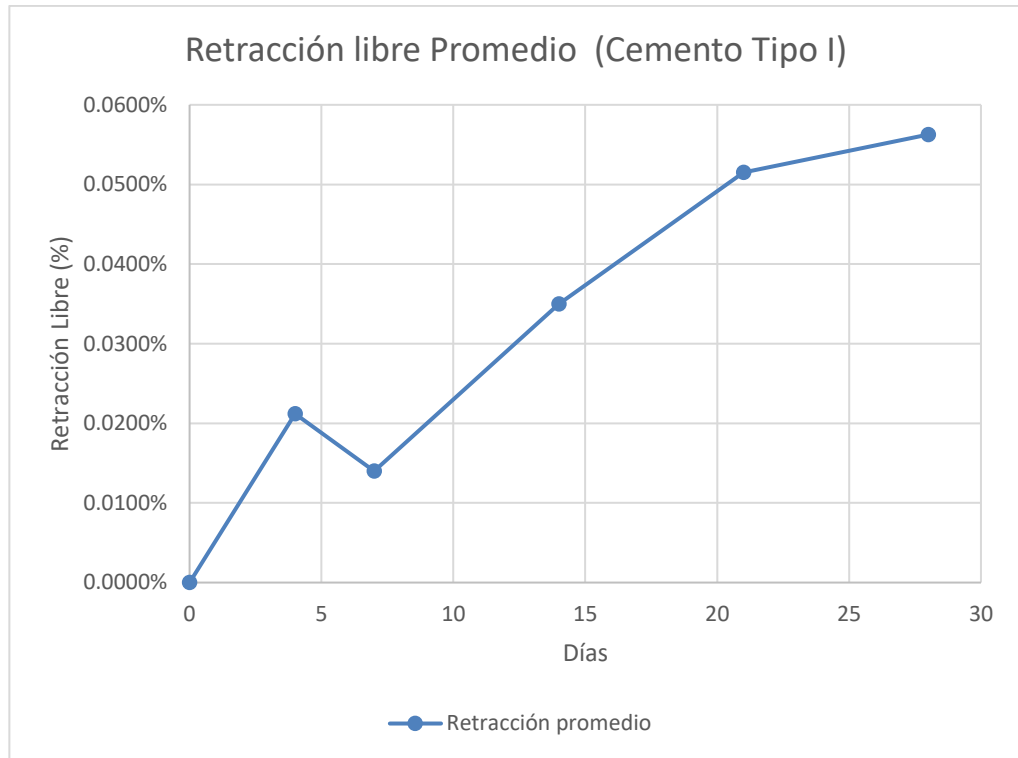


Figura 19 Variación promedio de retracción libre para el diseño patrón  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 19 se muestra la variación promedio de la retracción libre del diseño de mezcla patrón con cemento tipo I donde tiene un comportamiento de expansión entre los días 6 y 8 de desencofrado las muestras, a los 28 días llega a tener una lectura promedio de retracción libre de casi 0.06% en disminución del promedio en longitud de las muestras.

#### *Diseño con cemento tipo IP*

En la Tabla 20 se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de retracción libre para el Diseño de mezcla con cemento de tipo IP donde se indica la lectura promedio por edad es el resultado de la media de las 4 lecturas realizadas con el comparador de longitud por edad de cada vigueta graficado en la Figura 20.

Tabla 20  
Resultados del ensayo de Retracción Libre para el diseño con cemento tipo IP

Muestra	Edad	Lectura prom. (mm)	Variación (mm)	Retracción Libre (%)
M-1	0	7.653	-	0.0000%
M-1	4	7.635	0.0180	0.0072%
M-1	7	7.575	0.0775	0.0310%
M-1	14	7.588	0.0650	0.0260%
M-1	21	7.515	0.1380	0.0552%
M-1	28	7.448	0.2041	0.0817%
M-2	0	7.656	-	0.0000%
M-2	4	7.625	0.0305	0.0122%
M-2	7	7.598	0.0575	0.0230%
M-2	14	7.630	0.0260	0.0104%
M-2	21	7.556	0.1000	0.0400%
M-2	28	7.492	0.1630	0.0652%
M-3	0	7.220	-	0.0000%
M-3	4	7.200	0.0200	0.0080%
M-3	7	7.193	0.0270	0.0108%
M-3	14	7.201	0.0183	0.0073%
M-3	21	7.058	0.1615	0.0646%
M-3	28	7.045	0.1750	0.0700%

Elaboración Propia

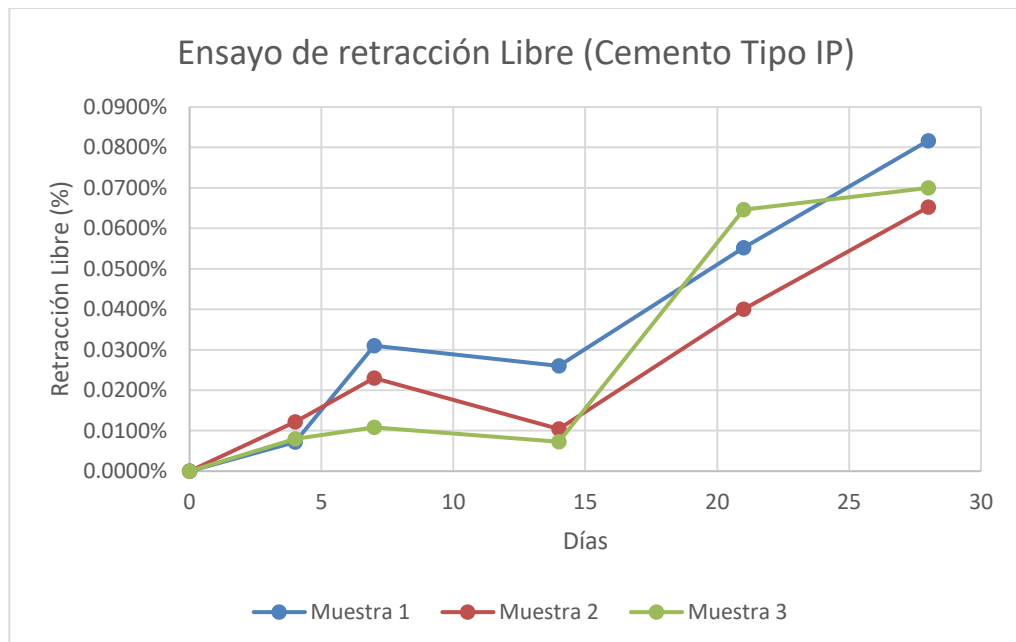


Figura 20 Gráfica de los resultados del ensayo de retracción libre para el diseño con cemento tipo IP

Fuente: Elaboración propio

Del promedio de los datos presentados en la Tabla 20 se obtiene la Tabla 21 las cual se representa en la Figura 21.

Tabla 21  
 Variación promedio de la retracción libre en longitud del diseño con cemento tipo IP

Diseño	Edad	Retracción Libre (%)
IP	0	0.0000%
IP	4	0.0091%
IP	7	0.0216%
IP	14	0.0146%
IP	21	0.0533%
IP	28	0.0723%

Elaboración Propia

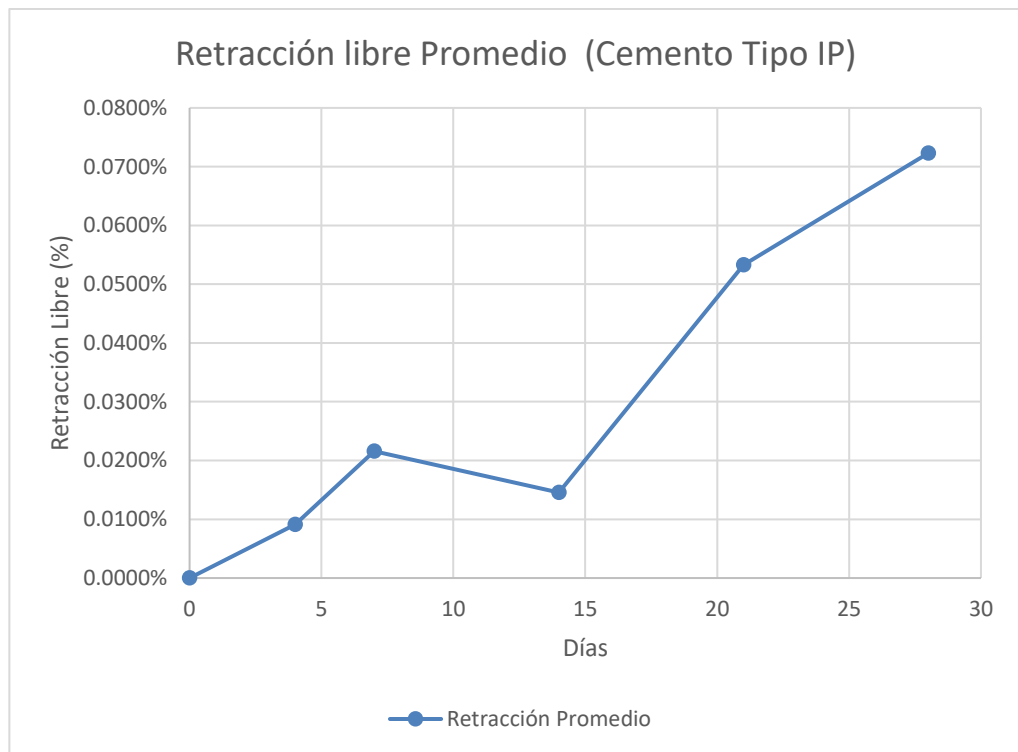


Figura 21 Variación de retracción libre para el diseño de mezcla con cemento tipo IP  
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se muestra la variación promedio de la retracción libre del diseño de mezcla con cemento tipo IP donde tiene un comportamiento de expansión entre los días 10 y 15 de desencofrado las muestras, a los 28 días llega a tener una lectura promedio de retracción libre ligeramente mayor a 0.07% en disminución del promedio en longitud de las muestras.



*Diseño con cemento tipo HE*

En la Tabla 22 se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de retracción libre para el Diseño de mezcla con cemento de tipo HE donde se indica la lectura promedio por edad es el resultado de la media de las 4 lecturas realizadas con el comparador de longitud por edad en cada vigueta graficado en la Figura 22.

Tabla 22  
 Resultados del ensayo de Retracción Libre para el diseño con cemento tipo HE

<b>Muestra</b>	<b>Edad</b>	<b>Lectura prom. (mm)</b>	<b>Variación (mm)</b>	<b>Retracción Libre (%)</b>
M-1	0	11.562	-	0.0000%
M-1	4	11.517	0.0450	0.0180%
M-1	7	11.509	0.0530	0.0212%
M-1	14	11.482	0.0805	0.0322%
M-1	21	11.497	0.0650	0.0260%
M-1	28	11.442	0.1205	0.0482%
M-2	0	4.718	-	0.0000%
M-2	4	4.676	0.0420	0.0168%
M-2	7	4.675	0.0430	0.0172%
M-2	14	4.629	0.0885	0.0354%
M-2	21	4.642	0.0760	0.0304%
M-2	28	4.632	0.0860	0.0344%
M-3	0	8.664	-	0.0000%
M-3	4	8.620	0.0440	0.0176%
M-3	7	8.600	0.0640	0.0256%
M-3	14	8.567	0.0970	0.0388%
M-3	21	8.577	0.0870	0.0348%
M-3	28	8.558	0.1055	0.0422%

Elaboración propia

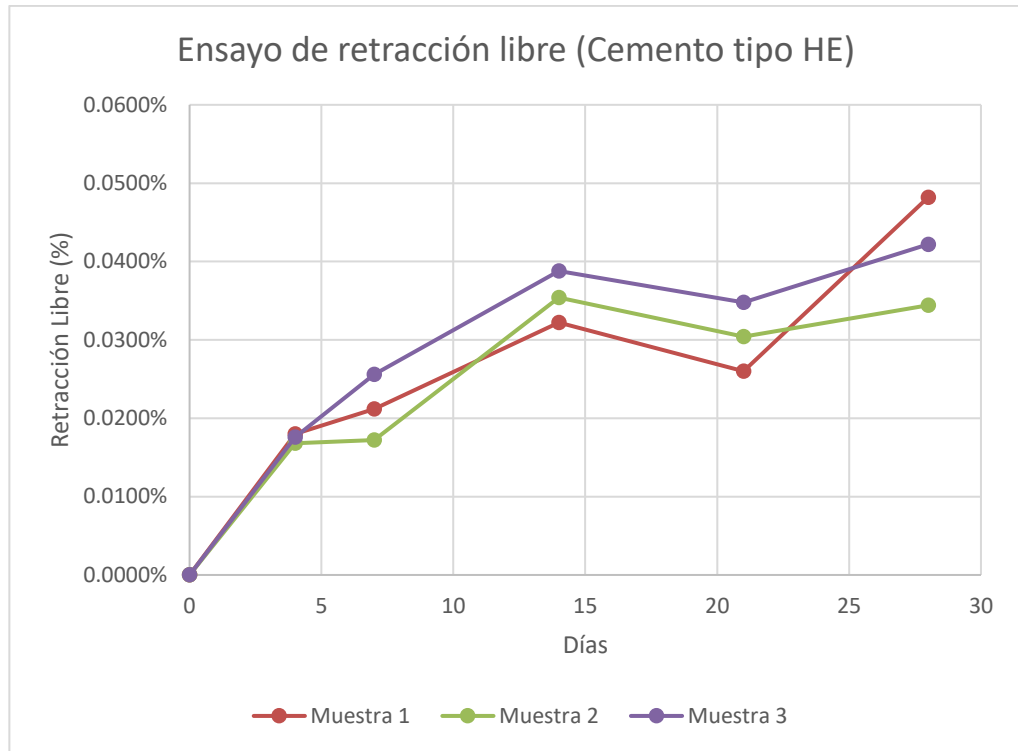


Figura 22 Gráfica de los resultados del ensayo de retracción libre para el diseño con cemento tipo HE. Elaboración propia

Del promedio de los datos presentados en la Tabla 22 se obtiene la Tabla 23 la cual se representa en la Figura 23.

Tabla 23  
 Variación promedio de la retracción libre en longitud del diseño con cemento tipo HE

Diseño	Edad	Retracción Libre (%)
HE	0	0.0000%
HE	4	0.0175%
HE	7	0.0213%
HE	14	0.0355%
HE	21	0.0304%
HE	28	0.0416%

Elaboración propia

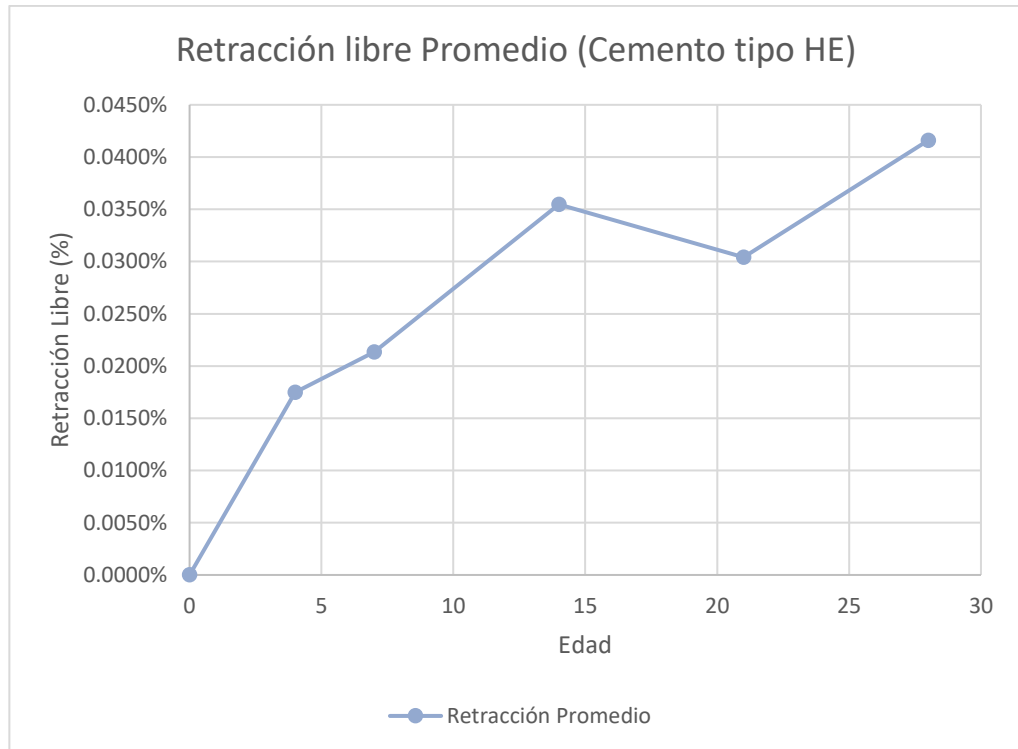


Figura 23 Variación de retracción libre para el diseño de mezcla con cemento tipo HE  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 23 se muestra la variación promedio de la retracción libre del diseño de mezcla con cemento tipo HE donde tiene un comportamiento de expansión entre los días 20 y 22 de desencofrado las muestras, a los 28 días llega a tener una lectura promedio de retracción libre ligeramente mayor a 0.04% en disminución en longitud de las muestras.

#### 4.1.2 Comparativo de resultados del ensayo de Retracción Libre

Con los resultados mostrados en la sección 4.1.1 respecto a la retracción libre promedio por diseño se generó la Tabla 24 y la Figura 24 para realizar el análisis comparativo por tipo de cemento y observar la variabilidad del efecto de la retracción en las muestras durante un periodo de observación de 28 días de cada tanda de muestreo en las mismas condiciones de almacenamiento y curado.

Tabla 24  
Resumen de resultados del promedio del ensayo de Retracción Libre por diseño

Diseño	Edad	Retracción Libre (%)
Patrón	0	0.0000%
	4	0.0212%
	7	0.0140%
	14	0.0350%
	21	0.0515%
	28	0.0563%
IP	0	0.0000%
	4	0.0091%
	7	0.0216%
	14	0.0146%
	21	0.0533%
	28	0.0723%
HE	0	0.0000%
	4	0.0175%
	7	0.0213%
	14	0.0355%
	21	0.0304%
	28	0.0416%

Elaboración propia

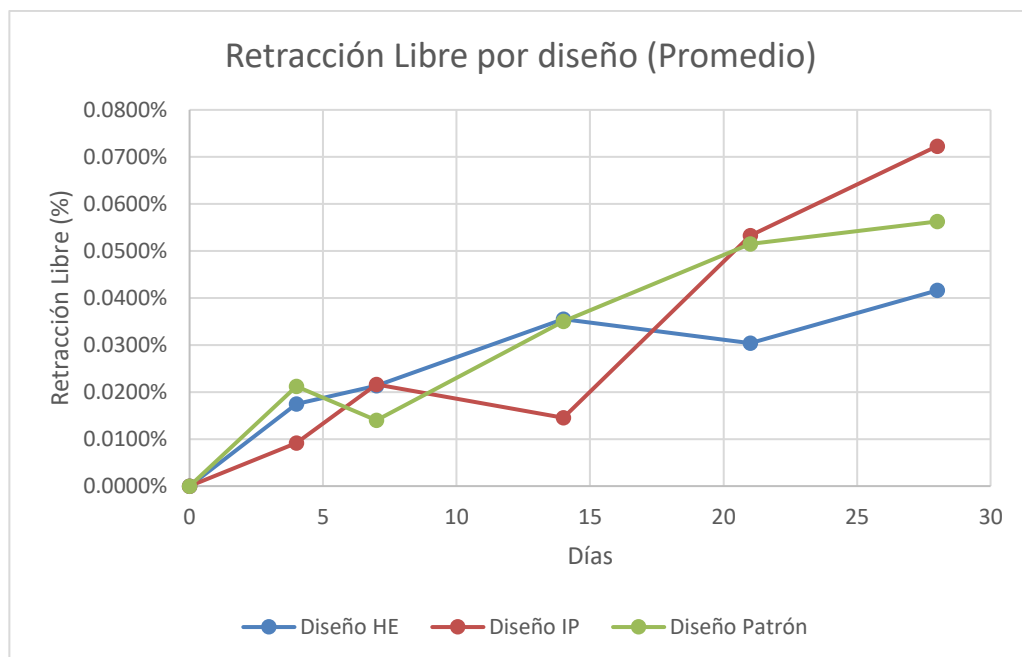


Figura 24 Gráfica del ensayo de Retracción Libre por diseño  
Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 24 la variabilidad y tendencia de la retracción en condición libre difiere según el tipo de cemento a emplear donde la mayor magnitud de retracción se observa en el diseño de mezcla con cemento tipo IP a partir de la edad de 21 días; Por otro lado, el diseño con cemento tipo HE su tendencia a la retracción libre es menor y con una variabilidad no tan pronunciada a comparación de los otros dos diseños en análisis.

Todos los diseños presentan una pequeña etapa de expansión en donde la longitud de la muestra aumenta que se presenta en distintas edades de la muestra. Se puede relacionar a priori que este efecto también depende del tipo de cemento.

## 4.2 Ensayo de retracción restringida

### 4.2.1 Resultados del ensayo de retracción restringida por diseño

#### *Diseño Patrón*

En la Tabla 25 se presenta las lecturas de las fisuras en el anillo de concreto del diseño patrón con cemento tipo I con la regla de fisura las cuales se les hizo el seguimiento desde la aparición de estas hasta los 28 días para evaluar los cambios en ancho en el tiempo tal como se puede observar en la Figura 25.

Tabla 25  
Resultados del ensayo de retracción restringida para el anillo con el diseño patrón con cemento tipo I

Edad	Ancho de Fisura N°1 (mm)	Ancho de Fisura N°2 (mm)	Ancho de Fisura N°3 (mm)	Ancho de Fisura N°4 (mm)	Ancho de Fisura N°5 (mm)
7	0	0.05	0	0.1	0
8	0	0.05	0	0.1	0
9	0.1	0.05	0	0.15	0
10	0.1	0.1	0.1	0.15	0
11	0.15	0.1	0.1	0.2	0.1
12	0.15	0.15	0.1	0.2	0.15
13	0.2	0.15	0.1	0.2	0.15
14	0.2	0.15	0.15	0.3	0.15
15	0.2	0.2	0.15	0.3	0.25
16	0.3	0.2	0.15	0.3	0.3
17	0.3	0.2	0.15	0.3	0.3
18	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3

19	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
20	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3
21	0.4	0.3	0.2	0.4	0.4
22	0.4	0.3	0.2	0.4	0.4
23	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
24	0.4	0.4	0.2	0.4	0.4
25	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
26	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4
27	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4
28	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4

Elaboración Propia

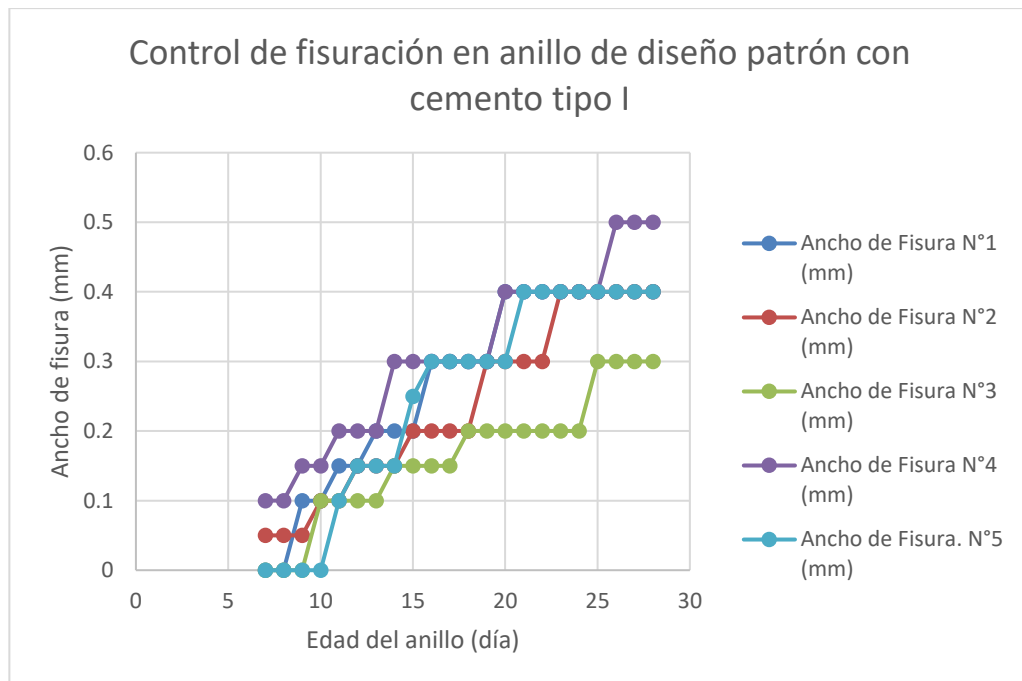


Figura 25 Gráfica del control de fisuración en anillo de diseño patrón con cemento tipo I  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 25 se observa la evolución de las 5 fisuras originadas en el anillo, las cuales comienzan a generarse a partir de la primera semana de edad del anillo con aumento en ancho entre los días 10 y 25 de edad del anillo, donde llegan a tener anchos de 0.3mm a 0.5mm a los 25 días de edad.

Tomando como referencia lo indicado en la norma NTP 339.212.2016 donde se indica el potencial de agrietamiento según la aparición de la fisura en los anillos de concreto tal como se indica en la Tabla 6, el diseño patrón con cemento tipo I tiene un potencial de agrietamiento alto ya que la aparición de fisuras ocurre durante la primera semana de edad de la muestra.

*Diseño con cemento tipo IP*

En la Tabla 26 se presenta las lecturas de las fisuras en el anillo de concreto del diseño con cemento tipo IP medidas con la regla de fisura las cuales se les hizo el seguimiento desde la aparición de estas hasta los 28 días para evaluar los cambios en ancho en el tiempo tal como se puede observar en la Figura 26.

*Tabla 26*  
*Resultados del ensayo de retracción restringida para el anillo con el diseño con cemento tipo IP*

<b>Edad</b>	<b>Ancho de Fisura N°1 (mm)</b>	<b>Ancho de Fisura N°2 (mm)</b>	<b>Ancho de Fisura N°3 (mm)</b>	<b>Ancho de Fisura N°4 (mm)</b>	<b>Ancho de Fisura. N°5 (mm)</b>	<b>Ancho de Fisura. N°6 (mm)</b>
13	0.2	0	0	0.25	0	0
14	0.2	0.2	0	0.25	0	0
15	0.3	0.3	0	0.25	0	0
16	0.3	0.4	0.1	0.3	0.1	0.05
17	0.4	0.4	0.1	0.3	0.2	0.1
18	0.4	0.5	0.15	0.3	0.2	0.1
19	0.5	0.5	0.15	0.3	0.2	0.15
20	0.5	0.5	0.15	0.4	0.3	0.2
21	0.6	0.6	0.2	0.4	0.3	0.2
22	0.6	0.6	0.2	0.4	0.4	0.2
23	0.6	0.6	0.2	0.5	0.4	0.3
24	0.6	0.6	0.3	0.5	0.4	0.3
25	0.6	0.6	0.3	0.5	0.5	0.3
26	0.6	0.6	0.3	0.5	0.6	0.3
27	0.6	0.6	0.4	0.5	0.6	0.3
28	0.6	0.6	0.4	0.5	0.6	0.3

Elaboración propia

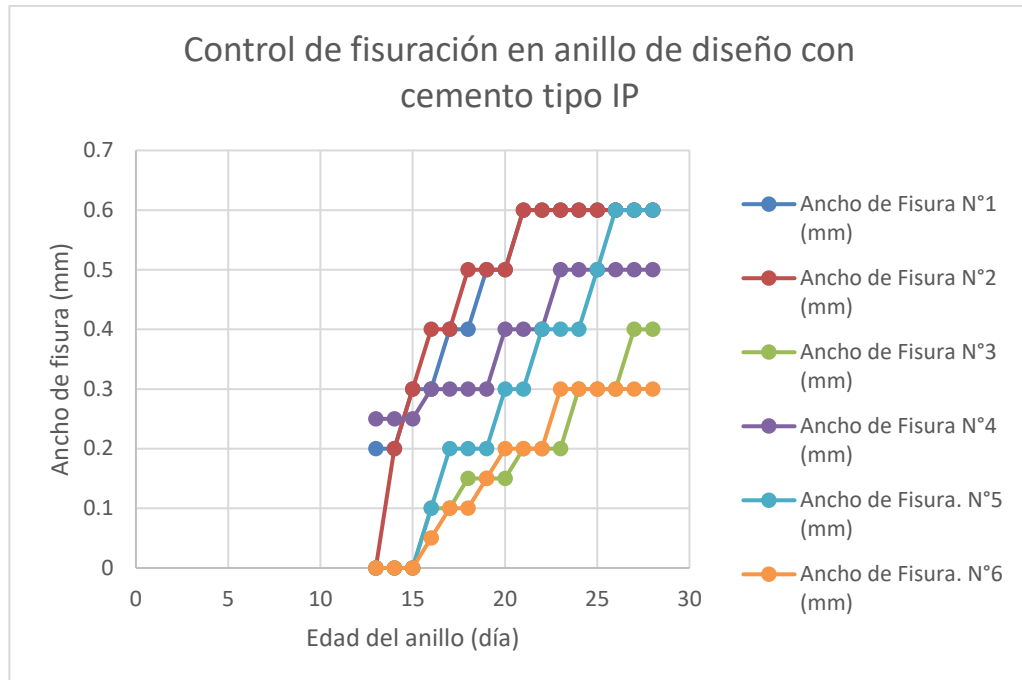


Figura 26 Gráfica del control de fisuración en anillo de diseño con cemento tipo IP  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 26 se observa la evolución de las 6 fisuras originadas en el anillo, las cuales comienzan a generarse a partir de los últimos días de la segunda semana de edad del anillo con aumento en ancho entre los días 15 y 25 de edad del anillo, donde llegan a tener anchos de 0.3mm a 0.6mm a los 25 días de edad.

Según lo indicado en la norma NTP 339.212.2016 donde se indica el potencial de agrietamiento relacionado con la aparición de la fisura en los anillos de concreto tal como se indica en la Tabla 6, el diseño con cemento tipo IP tiene un potencial de agrietamiento moderado alto con tendencia a moderado bajo ya que la aparición de fisuras ocurre finalizando la segunda semana de edad del anillo.

#### *Diseño con cemento tipo HE*

En la Tabla 27 se presenta las lecturas de las fisuras en el anillo de concreto del diseño con cemento tipo HE con la regla de fisura las cuales se les hizo el seguimiento desde la aparición de estas hasta los 28 días para evaluar los cambios en ancho en el tiempo tal como se puede observar en la Figura 27.



Tabla 27  
Resultados del ensayo de retracción restringida para el anillo con el diseño con cemento tipo HE

Edad	Ancho de Fisura N°1 (mm)	Ancho de Fisura N°2 (mm)	Ancho de Fisura N°3 (mm)	Ancho de Fisura. N°4 (mm)
10	0.2	0.05	0	0.05
11	0.3	0.05	0.15	0.1
12	0.4	0.1	0.25	0.1
13	0.4	0.15	0.3	0.15
14	0.4	0.2	0.3	0.2
15	0.4	0.2	0.3	0.2
16	0.4	0.2	0.3	0.2
17	0.4	0.2	0.3	0.2
18	0.4	0.2	0.3	0.2
19	0.4	0.2	0.3	0.2
20	0.4	0.2	0.3	0.2
21	0.5	0.2	0.3	0.2
22	0.5	0.3	0.3	0.2
23	0.5	0.3	0.3	0.2
24	0.5	0.3	0.3	0.2
25	0.5	0.3	0.3	0.2
26	0.5	0.3	0.3	0.2
27	0.5	0.3	0.3	0.2
28	0.5	0.3	0.3	0.2

Elaboración propia

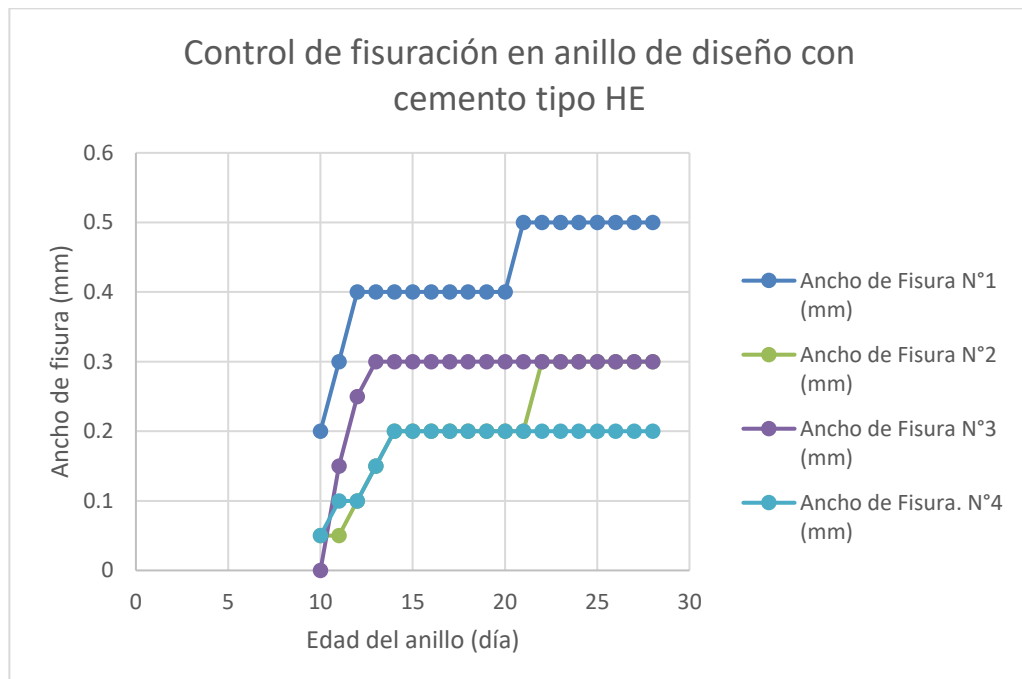


Figura 27 Gráfica del control de fisuración en anillo de diseño con cemento tipo HE.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27 se observa la evolución de las 4 fisuras originadas en el anillo, las cuales comienzan a generarse durante la segunda semana de edad del anillo con aumento en ancho entre los días 10 y 22 de edad del anillo, donde llegan a tener anchos de 0.2mm a 0.6mm a los 22 días de edad.

Según lo indicado en la norma NTP 339.212.2016 donde se indica el potencial de agrietamiento relacionado con la aparición de la fisura en los anillos de concreto tal como se indica en la Tabla 6, el diseño con cemento tipo HE tiene un potencial de agrietamiento moderado alto ya que la aparición de fisuras ocurre durante la segunda semana de edad del anillo.

#### 4.2.2 Comparativo entre el comportamiento de las fisuras por la retracción restringida y los promedios del ensayo de retracción libre

Dado que el ensayo de retracción restringida en los anillos de concreto es del tipo cualitativo y el ensayo de retracción libre en las vigas es del tipo cuantitativo, ambos escenarios se representaron en una gráfica común que permite observar el desarrollo de las fisuras en promedio frente a la retracción libre promedio por cada diseño.

##### *Diseño patrón*

A partir de la Tabla 19 que muestra los resultados de retracción libre y los promedios del ancho de las fisuras por edad mostrados en la Tabla 25 correspondiente al diseño patrón con cemento tipo I, se obtuvo una relación de datos por ensayo en el tiempo indicados en la Tabla 28 y Figura 28.

Tabla 28

Resultados promedio de los ensayos de retracción libre y retracción restringida para el diseño patrón elaborado con cemento tipo I

Edad	Retracción restringida - Ancho de fisura promedio (mm)	Retracción Libre - variación porcentual promedio (%)	Edad	Retracción restringida - Ancho de fisura promedio (mm)	Retracción Libre - variación porcentual promedio (%)
0	-	0.0000%	15	0.22	0.0374%
1	-	0.0053%	16	0.25	0.0397%
2	-	0.0106%	17	0.25	0.0421%
3	-	0.0159%	18	0.26	0.0444%
4	-	0.0212%	19	0.28	0.0468%
5	-	0.0188%	20	0.32	0.0491%
6	-	0.0164%	21	0.34	0.0515%
7	0.03	0.0140%	22	0.34	0.0522%
8	0.03	0.0170%	23	0.36	0.0529%
9	0.06	0.0200%	24	0.36	0.0535%
10	0.09	0.0230%	25	0.38	0.0542%
11	0.13	0.0260%	26	0.4	0.0549%
12	0.15	0.0290%	27	0.4	0.0556%
13	0.16	0.0320%	28	0.4	0.0563%
14	0.19	0.0350%			

Elaboración propia

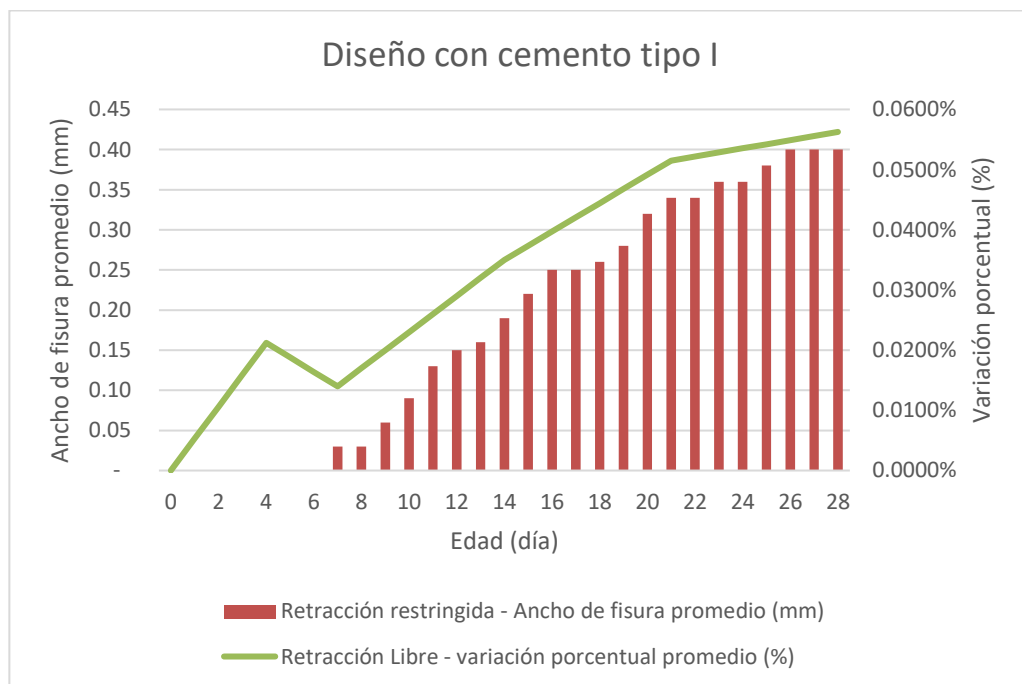


Figura 28 Gráfica del comportamiento de los resultados del ensayo de retracción libre con el de retracción restringida en el tiempo para el diseño patrón con cemento tipo I  
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 28 el comportamiento de los anchos promedios de las fisuras en el anillo tiene un crecimiento a escala similar al crecimiento de la variación promedio porcentual de la longitud de las vigas analizadas en el ensayo de retracción libre, con inicio de aparición de fisuras en el día 8 de edad del anillo.

#### *Diseño con cemento tipo IP*

A partir de la Tabla 21 que muestra los resultados de retracción libre y los promedios del ancho de las fisuras por edad mostrados en la Tabla 26 correspondiente al diseño con cemento tipo IP, se obtuvo una relación de datos por ensayo en el tiempo indicados en la Tabla 29 y Figura 29.

*Tabla 29*

*Resultados promedio de los ensayos de retracción libre y retracción restringida para el diseño elaborado con cemento tipo IP*

<b>Edad</b>	<b>Retracción restringida - Ancho de fisura promedio (mm)</b>	<b>Retracción Libre - variación porcentual promedio (%)</b>	<b>Edad</b>	<b>Retracción restringida - Ancho de fisura promedio (mm)</b>	<b>Retracción Libre - variación porcentual promedio (%)</b>
0	-	0.0000%	15	0.14	0.0201%
1	-	0.0023%	16	0.21	0.0256%
2	-	0.0046%	17	0.25	0.0312%
3	-	0.0068%	18	0.28	0.0367%
4	-	0.0091%	19	0.30	0.0422%
5	-	0.0133%	20	0.34	0.0477%
6	-	0.0174%	21	0.38	0.0533%
7	-	0.0216%	22	0.40	0.0560%
8	-	0.0206%	23	0.43	0.0587%
9	-	0.0196%	24	0.45	0.0614%
10	-	0.0186%	25	0.47	0.0641%
11	-	0.0176%	26	0.48	0.0669%
12	-	0.0166%	27	0.50	0.0696%
13	0.08	0.0156%	28	0.50	0.0723%
14	0.11	0.0146%			

Elaboración propia

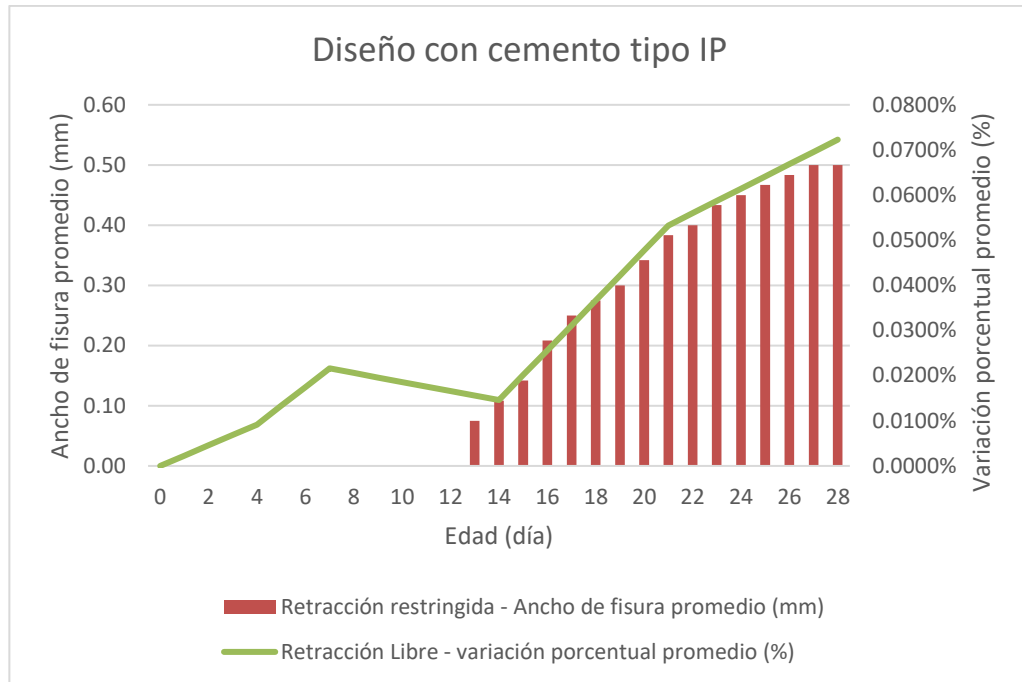


Figura 29 Gráfica del comportamiento de los resultados del ensayo de retracción libre con el retracción restringida en el tiempo para el diseño con cemento tipo IP. Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 29 la aparición de fisuras y su aumento de su dimensión en ancho ocurre a fines de la segunda semana de edad del anillo cerca al día en donde el ensayo de retracción libre registra un aumento en la variación de longitud de las vigas de muestra.

#### Diseño con cemento tipo HE

A partir de la Tabla 23 que muestra los resultados de retracción libre y los promedios del ancho de las fisuras por edad mostrados en la Tabla 27 correspondiente al diseño con cemento tipo HE, se obtuvo una relación de datos por ensayo en el tiempo indicados en la Tabla 30 y Figura 30.

Tabla 30  
Resultados promedio de los ensayos de retracción libre y retracción restringida para el diseño elaborado con cemento tipo HE

Edad	Retracción restringida - Ancho de fisura promedio (mm)	Retracción Libre - variación porcentual promedio (%)	Edad	Retracción restringida - Ancho de fisura promedio (mm)	Retracción Libre - variación porcentual promedio (%)
0	-	0.0000%	15	0.28	0.0347%
1	-	0.0044%	16	0.28	0.0340%
2	-	0.0087%	17	0.28	0.0333%
3	-	0.0131%	18	0.28	0.0326%
4	-	0.0175%	19	0.28	0.0318%
5	-	0.0188%	20	0.28	0.0311%
6	-	0.0200%	21	0.30	0.0304%
7	-	0.0213%	22	0.33	0.0320%
8	-	0.0234%	23	0.33	0.0336%
9	-	0.0254%	24	0.33	0.0352%
10	0.08	0.0274%	25	0.33	0.0368%
11	0.15	0.0294%	26	0.33	0.0384%
12	0.21	0.0314%	27	0.33	0.0400%
13	0.25	0.0334%	28	0.33	0.0416%
14	0.28	0.0355%			

Elaboración propia

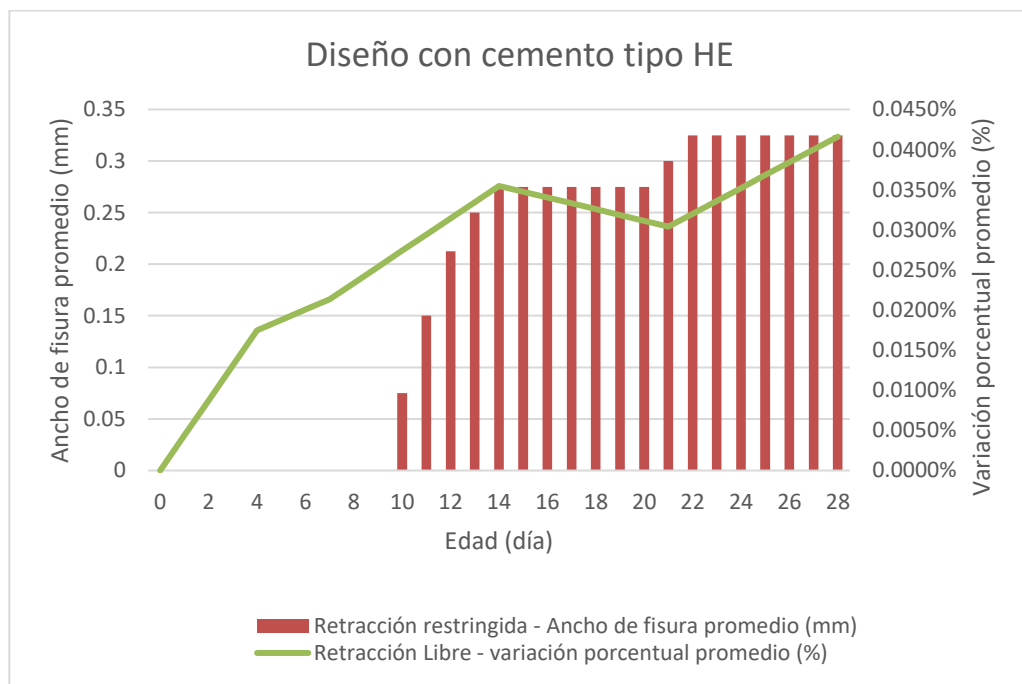


Figura 30 Gráfica del comportamiento de los resultados del ensayo de retracción libre con el de retracción restringida en el tiempo para el diseño con cemento tipo HE.

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 30 el comportamiento de la fisuración del anillo de concreto inicia en el día 10 de edad cuando se tiene un aumento en la variación promedio de la retracción libre. Sin embargo, al iniciar la tercera semana de las muestras las fisuras se mantuvieron con el mismo ancho por toda esa semana que podría relacionarse con la disminución porcentual de la variación de retracción libre hasta al inicio de la tercera semana que se genera nuevamente un ligero aumento del ancho promedio de las fisuras del anillo con la variación porcentual de la retracción libre.

### 4.3 Ensayo a la compresión de muestras cilíndricas

#### 4.3.1 Resultados del ensayo a la compresión

##### *Diseño patrón*

Del diseño patrón con cemento tipo I se elaboraron cuatro muestras cilíndricas que fueron ensayadas a los 7 y 28 días de edad obteniendo la siguiente Tabla 31 y Figura 31.

Tabla 31  
Resultados del ensayo a la compresión de las muestras del diseño patrón con cemento tipo I

Probeta	Edad	Diámetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )
P-1	7	10.09	79.90	23,856	299
P-2	7	9.97	78.08	24,677	316
P-3	28	9.99	78.38	37,196	475
P-4	28	10.03	79.01	35,718	452

Elaboración propia

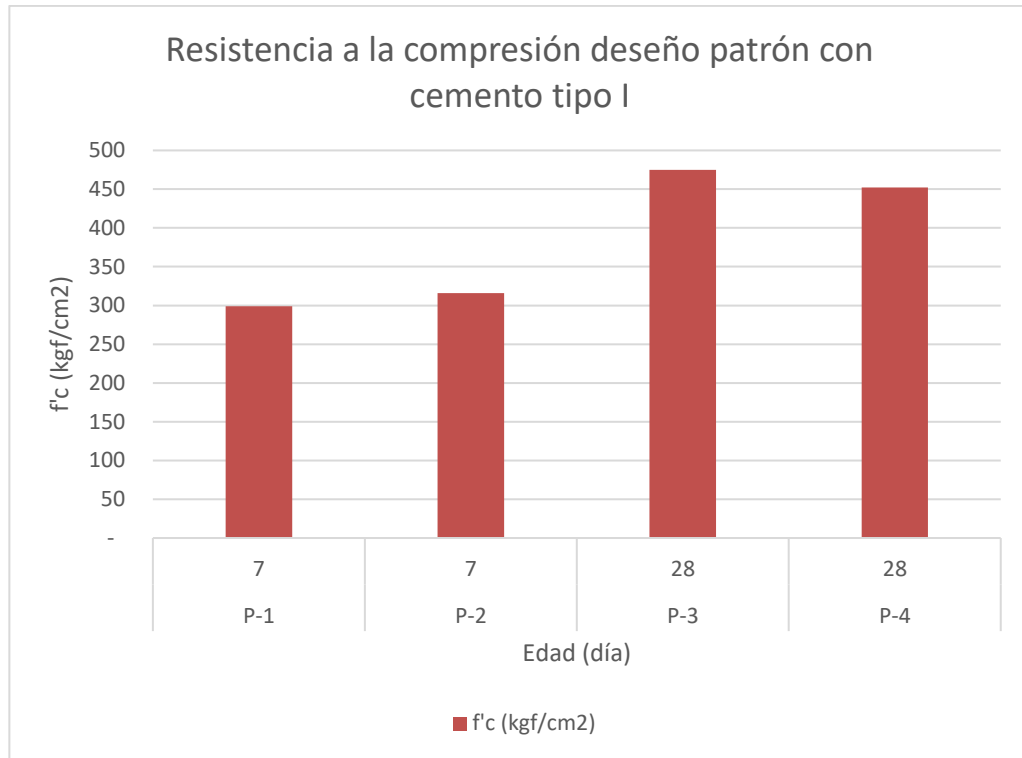


Figura 31 Gráfica del ensayo a la compresión del diseño patrón con cemento tipo I.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 31 se observa que el  $f'c$  ha alcanzado el 68% de la resistencia de diseño que es  $450 \text{ kg/cm}^2$  a los 7 días y a los 28 días de edad alcanza a un 103% en promedio del  $f'c$  de diseño.

#### Diseño con cemento tipo IP

Del diseño con cemento tipo IP se elaboraron cuatro muestras cilíndricas que fueron ensayadas a los 7 y 28 días de edad obteniendo la siguiente Tabla 32 y Figura 32.

Tabla 32  
Resultados del ensayo a la compresión de las muestras del diseño con cemento tipo IP

Probeta	Edad	Diámetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )
P-1	7	10.09	79.96	24,405.00	305
P-2	7	10.09	79.96	26,369.00	330
P-3	28	10.05	79.33	38,654.00	487
P-4	28	10.01	78.70	37,796.00	480

Elaboración propia



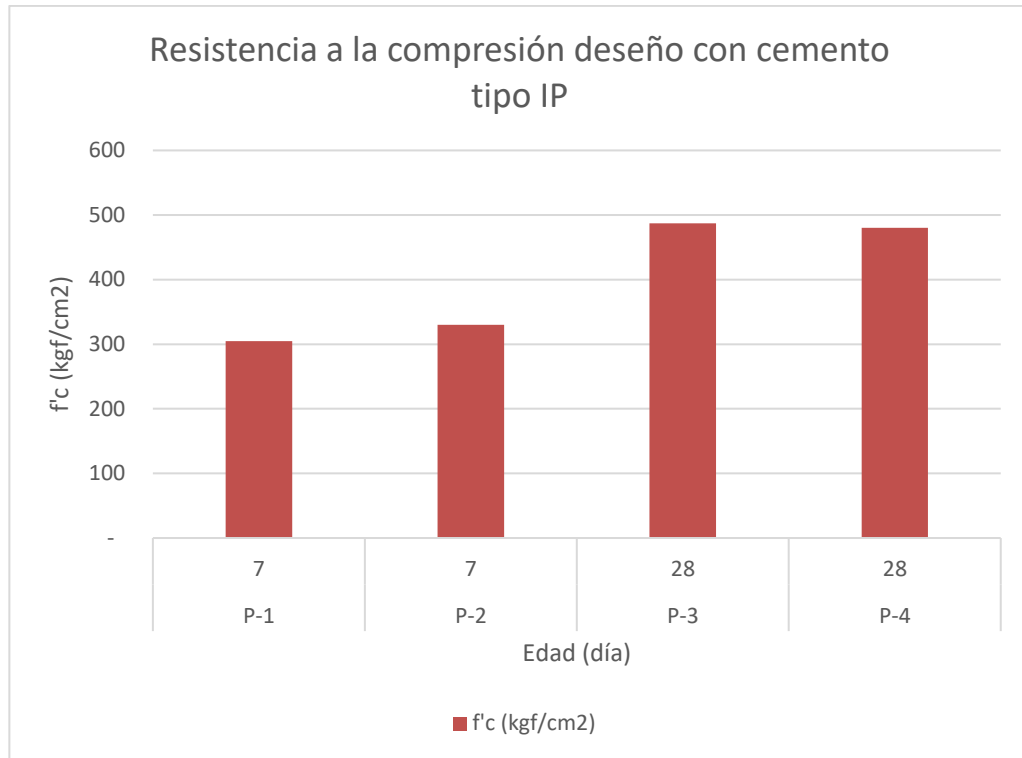


Figura 32 Gráfica del ensayo a la compresión del diseño con cemento tipo IP  
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 32 se observa que el  $f'c$  promedio a los 7 días de edad es el 70.5% de la resistencia de diseño y a los 28 días de edad el  $f'c$  promedio es el 107% de la resistencia de diseño.

#### Diseño con cemento tipo HE

Del diseño con cemento tipo IP se elaboraron cuatro muestras cilíndricas que fueron ensayadas a los 7 y 28 días de edad obteniendo la siguiente Tabla 33 y Figura 33.

Tabla 33  
Resultados del ensayo a la compresión de las muestras del diseño con cemento tipo HE

Probeta	Edad	Diámetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Fuerza (kgf)	f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )
P-1	7	10.05	79.33	32,467.00	409
P-2	7	10.07	79.64	31,177.00	391
P-3	28	10.05	79.33	39,649.00	482
P-4	28	10.03	79.01	37,356.00	498

Elaboración propia

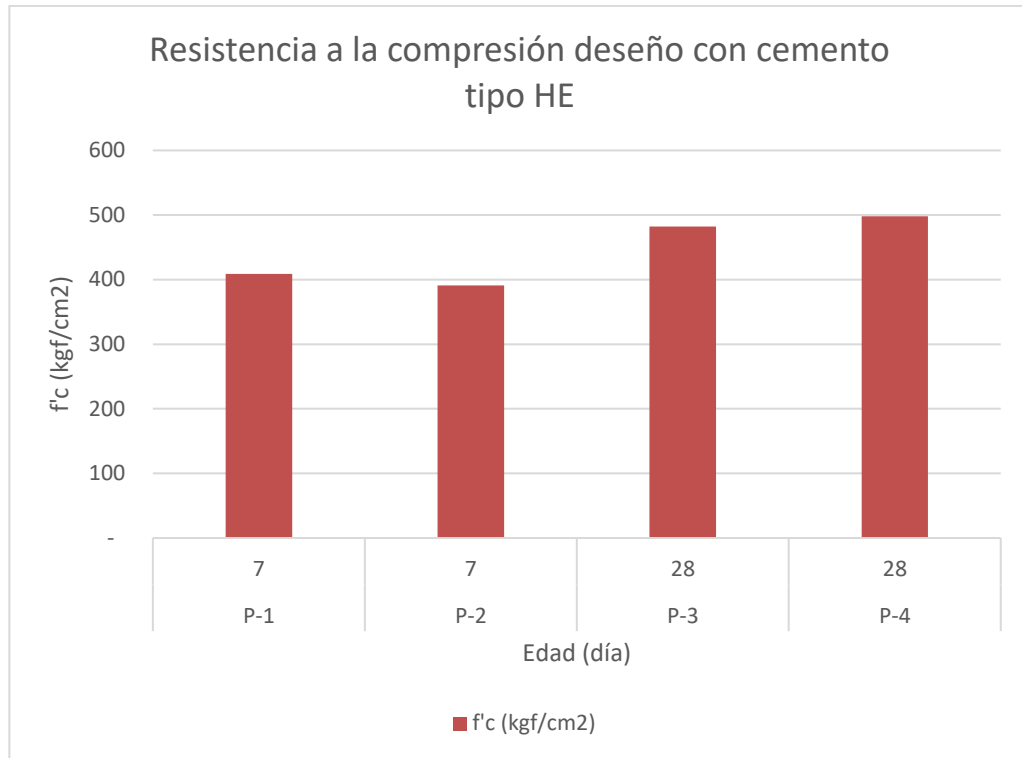


Figura 33 Gráfica del ensayo a la compresión del diseño con cemento tipo IP  
 Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 33 se observa que el  $f'c$  promedio a los 7 días llega al 88.8% del  $f'c$  de diseño y a los 28 días sobrepasa hasta los 108.8% del  $f'c$  de diseño.

#### 4.3.2 Comparativo de los resultados del ensayo a la compresión

De los datos presentados en el apartado 4.3.2 se obtienen los promedios presentados en la Tabla 34 y Figura 34.

Tabla 34  
 $f'c$  promedio según tipo de cemento

Edad	$f'c$ (kgf/cm2) Cemento tipo I	$f'c$ (kgf/cm2) Cemento tipo IP	$f'c$ (kgf/cm2) Cemento tipo HE
7	308	318	400
28	464	484	490

Elaboración propia

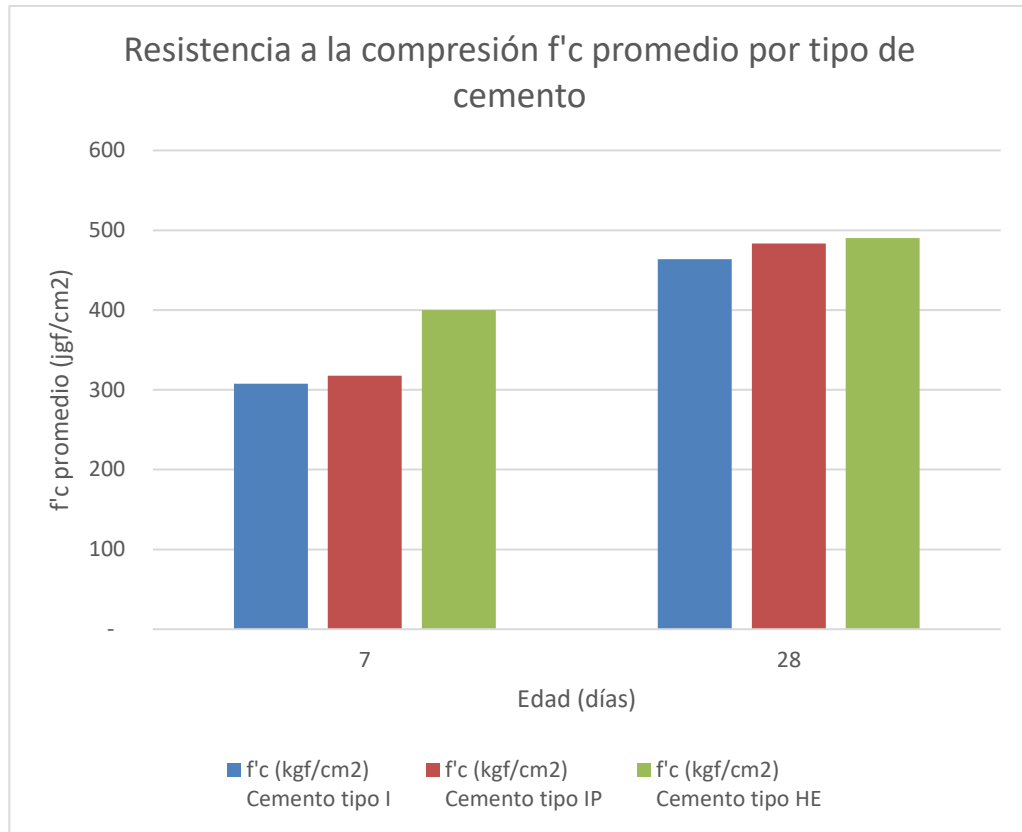


Figura 34 Gráfica de los  $f'c$  promedio según tipo de cemento  
 Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 34 se observa que el comportamiento del  $f'c$  del diseño con cemento tipo HE es como lo esperado para cementos con alta resistencia inicial, en cambio los otros tipos de cemento a los 7 días de edad alcanzan el 70% de resistencia de diseño. Para los tres tipos de cemento se logra superar la resistencia de  $f'c$  de 450 kgf/cm<sup>2</sup> de diseño a los 28 días.

#### 4.4 Retracción total según el modelo matemático MODELO CEB MC90-99 del Comité ACI 209 (2008).

Se determinó la evolución de la retracción según el modelo matemático CEB MC90-99 indicado por el Comité ACI 209 (2008) la cual calcula la retracción total compuesta de un componente que es la retracción por secado y el otro componente que es la retracción autógena; cuyos valores son calculados en base al tipo de cemento, tipo y condiciones de curado y las dimensiones de la muestra a estudiar.

Los datos obtenidos por modelo matemático se compararán con los resultados en el tiempo de la retracción libre del ensayo según descrito por el Comité ASTM C09 (2017).

#### 4.4.1 Diseño patrón con cemento tipo I

La retracción total en el tiempo mostrada en la Tabla 37, se obtiene del cálculo de la retracción por secado de la Tabla 35 y de la retracción autógena de la Tabla 36. Los datos obtenidos son comparados con los resultados del ensayo de retracción libre para el mismo diseño patrón con cemento tipo I indicados en la Tabla 19 obteniendo la gráfica de la Figura 35.

Tabla 35  
Retracción por secado para el diseño patrón con cemento tipo I según el modelo CEB MC90-99

Retracción por secado Cemento tipo I (MODELO CEB MC90-99)		
Tipo de cemento	$\alpha_{ds1}$	4
	$\alpha_{ds2}$	0.12
Coeficiente nocional de retracción por secado	$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + 110\alpha_{ds1})\exp(-\alpha_{ds2}f_{cm28}/f_{cmo})] \times 10^{-6}$	
	$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$	0.0385%
Factor de la humedad relativa	$\beta_{s1} = \left(\frac{3.5f_{cmo}}{f_{cm28}}\right)^{0.1} \leq 1.0$	
	$\beta_{s1}$	0.98
	$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[1 - \left(\frac{h}{h_0}\right)^3\right]$ para $0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1}$ $\vee$ $\beta_{RH}(h) = 0.25$ para $h \geq 0.99\beta_{s1}$	
	h (humedad relativa en decimales)	0.85
	$\beta_{RH}(h)$	0.6
Función en el tiempo de retracción por secado	$\beta_{ds}(t - t_c) = \left[\frac{(t - t_c) / t_1}{350[(V/S) / (V/S)_o]^2 + (t - t_c) / t_1}\right]^{0.5}$	
	(V/S)	25
	(V/S) <sub>o</sub>	50
Retracción por secado	$\varepsilon_{cdso}(t, t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28})\beta_{RH}(h)\beta_{ds}(t - t_c)$	
	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})</math></b>
	0	0.0000%

	4	0.0048%
	7	0.0063%
	14	0.0085%
	21	0.0101%
	28	0.0113%

Elaboración propia

Tabla 36  
Retracción autógena para el diseño patrón con cemento tipo I según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción autógena Cemento tipo I (MODELO CEB MC90-99)</b>		
Factor por tipo de cemento	$\alpha_{as}$	700
Coeficiente nocional de retracción autógena	$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm28}/f_{cm0}}{6 + f_{cm28}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \times 10^{-6}$	
	$\varepsilon_{caso}(f_{cm28})$	-0.008%
Función que describe el desarrollo de la retracción autógena en el tiempo	$\beta_{as}(t) = 1 - \exp \left[ -0.2 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{0.5} \right]$	
	$t_1$	1
	$\varepsilon_{cas} = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t)$	
	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{cas}(t)</math></b>
Retracción autógena	0	0.0000%
	4	0.0028%
	7	0.0035%
	14	0.0044%
	21	0.0051%
	28	0.0055%

Elaboración propia

Tabla 37  
Retracción total para el diseño patrón con cemento tipo I según el modelo CEB MC90-99

Retracción total Cemento tipo I (MODELO CEB MC90-99)		
	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c)$	
	t (edad)	$\varepsilon_{sh}(t)$
	0	0.0000%
	4	0.0076%
Retracción total	7	0.0097%
	14	0.0130%
	21	0.0152%
	28	0.0168%

Elaboración Propia

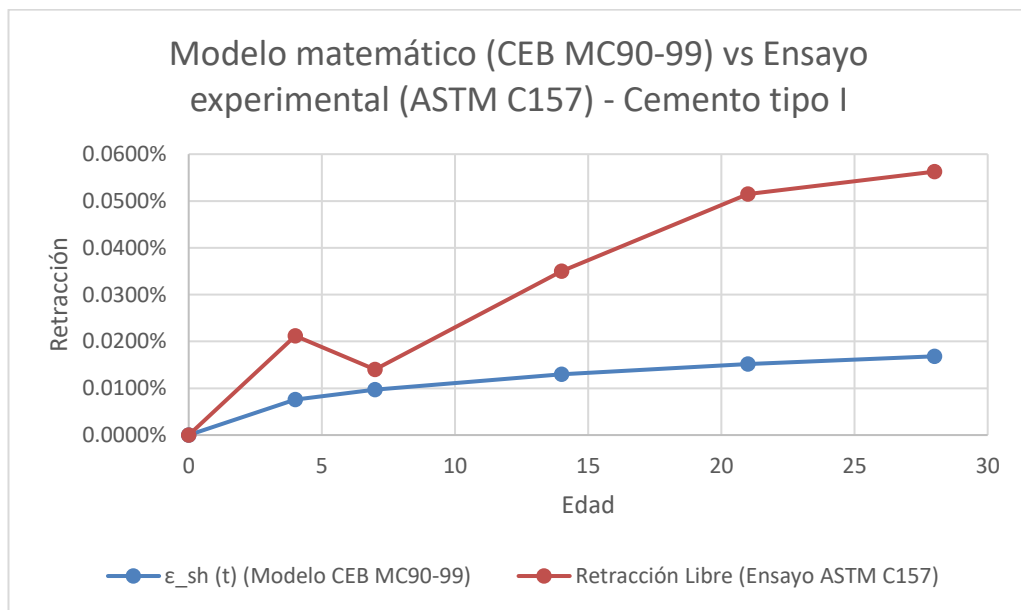


Figura 35 Gráfica de la curva de retracción del Modelo matemático (CEB MC90-99) y del ensayo experimental (ASTM C157) para el diseño patrón con cemento tipo I  
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 35 se observa una clara diferencia entre la retracción calculada por el modelo matemático CEB MC90-99 y la retracción obtenida del ensayo experimental con las vigas, la tendencia de crecimiento aparentemente se iguala a los 21 días de edad de las muestras.

#### 4.4.2 Diseño con cemento tipo IP

La retracción total en el tiempo mostrada en la Tabla 40, se obtiene del cálculo de la retracción por secado de la Tabla 38 y de la retracción autógena de la Tabla 39. Los datos obtenidos son comparados con los resultados del ensayo de retracción libre para el mismo diseño con cemento tipo IP indicados en la Tabla 21 obteniendo la gráfica de la Figura 36.

Tabla 38

Retracción por secado para el diseño con cemento tipo IP según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción por secado Cemento tipo IP (MODELO CEB MC90-99)</b>		
Tipo de cemento	$\alpha_{ds1}$	3
	$\alpha_{ds2}$	0.13
Coeficiente nocional de retracción por secado	$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} f_{cm28}/f_{cmo})] \times 10^{-6}$	
	$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$	0.0306%
	$\beta_{s1} = \left(\frac{3.5 f_{cmo}}{f_{cm28}}\right)^{0.1} \leq 1.0$	
Factor de la humedad relativa	$\beta_{s1}$	0.98
	$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[1 - \left(\frac{h}{h_o}\right)^3\right]$ para $0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1}$ $\vee$ $\beta_{RH}(h) = 0.25$ para $h \geq 0.99\beta_{s1}$	
h (humedad relativa en decimales)	h (humedad relativa en decimales)	0.89
	$\beta_{RH}(h)$	0.60
Función en el tiempo de retracción por secado	$\beta_{ds}(t - t_c) = \left[ \frac{(t - t_c) / t_1}{350[(V/S) / (V/S)_o]^2 + (t - t_c) / t_1} \right]^{0.5}$	
	(V/S)	25
	(V/S) <sub>o</sub>	50
	$\varepsilon_{cdso}(t, t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) \beta_{RH}(h) \beta_{ds}(t - t_c)$	
Retracción por secado	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})</math></b>
	0	0.0000%
	4	0.0038%
	7	0.0050%
	14	0.0052%
	21	0.081%
	28	0.0090%

Elaboración propia

Tabla 39

Retracción autógena para el diseño con cemento tipo IP según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción autógena Cemento tipo IP (MODELO CEB MC90-99)</b>		
Factor por tipo de cemento	$\alpha_{as}$	800
Coefficiente nocional de retracción autógena	$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm28}/f_{cm0}}{6 + f_{cm28}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \times 10^{-6}$	
Función que describe el desarrollo de la retracción autógena en el tiempo	$\beta_{as}(t) = 1 - \exp \left[ -0.2 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{0.5} \right]$	
	$t_1$	1
	$\varepsilon_{cas} = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t)$	
	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{cas}</math> (t)</b>
	0	0.0000%
	4	0.0032%
Retracción autógena	7	0.0040%
	14	0.0051%
	21	0.0058%
	28	0.0063%

Elaboración propia

Tabla 40

Retracción total para el diseño con cemento tipo IP según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción total Cemento tipo IP (MODELO CEB MC90-99)</b>		
	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c)$	
	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{sh}</math> (t)</b>
	0	0.0000%
	4	0.0070%
Retracción total	7	0.0089%
	14	0.0119%
	21	0.0138%
	28	0.0153%

Elaboración propia



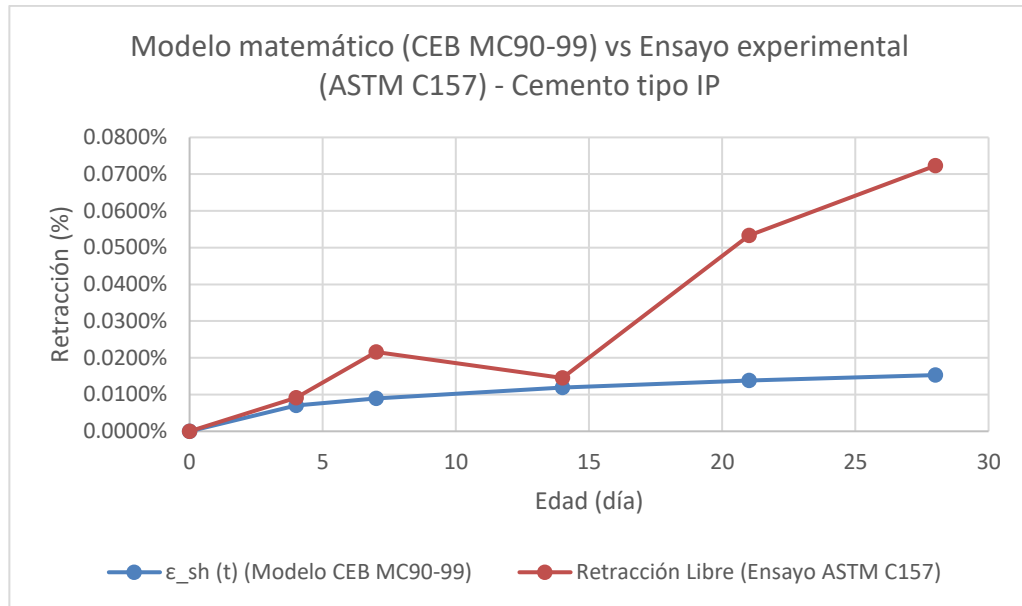


Figura 36 Gráfica de la curva de retracción del Modelo matemático (CEB MC90-99) y del ensayo experimental (ASTM C157) para el diseño con cemento tipo IP  
 Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 36 se observa que la tendencia de crecimiento de la retracción se iguala en los primeros 4 días, luego de ello el ensayo experimental muestra una tendencia a expansión, llamada también retracción negativa, de la muestra hasta el día 14 de edad para que finalmente la tendencia de la retracción experimental incremente en una proporción considerable mayor a la del modelo matemático CEB MC90-99.

#### 4.4.3 Diseño con cemento tipo HE

La retracción total en el tiempo mostrada en la Tabla 43, se obtiene del cálculo de la retracción por secado de la Tabla 41 y de la retracción autógena de la Tabla 42. Los datos obtenidos son comparados con los resultados del ensayo de retracción libre para el mismo diseño con cemento tipo HE indicados en la Tabla 21 obteniendo la gráfica de la Figura 37.

Tabla 41  
Retracción por secado para el diseño con cemento tipo HE según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción por secado Cemento tipo HE (MODELO CEB MC90-99)</b>		
Tipo de cemento	$\alpha_{ds1}$	6
	$\alpha_{ds2}$	0.12
Coeficiente nacional de retracción por secado	$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28}) = [(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} f_{cm28}/f_{cmo})] \times 10^{-6}$	
	$\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})$	0.0513%
Factor de la humedad relativa	$\beta_{s1} = \left(\frac{3.5f_{cmo}}{f_{cm28}}\right)^{0.1} \leq 1.0$	
	$\beta_{s1}$	0.98
	$\beta_{RH}(h) = -1.55 \left[1 - \left(\frac{h}{h_o}\right)^3\right]$ para $0.4 \leq h < 0.99\beta_{s1}$ $\vee$ $\beta_{RH}(h) = 0.25$ para $h \geq 0.99\beta_{s1}$	
	h (humedad relativa en decimales)	0.85
Función en el tiempo de retracción por secado	$\beta_{RH}(h)$	-
	$\beta_{ds}(t - t_c) = \left[\frac{(t - t_c) / t_1}{350[(V/S) / (V/S)_o]^2 + (t - t_c) / t_1}\right]^{0.5}$	
	(V/S)	25
	(V/S) <sub>o</sub>	50
	$\varepsilon_{cdso}(t, t_c) = \varepsilon_{cdso}(f_{cm28})\beta_{RH}(h)\beta_{ds}(t - t_c)$	
Retracción por secado	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{cdso}(f_{cm28})</math></b>
	0	0.0000%
	4	0.0064%
	7	0.0083%
	14	0.0114%
	21	0.0135%
	28	0.0151%

Elaboración propia

Tabla 42  
Retracción autógena para el diseño con cemento tipo HE según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción autógena Cemento tipo I (MODELO CEB MC90-99)</b>		
Factor por tipo de cemento	$\alpha_{as}$	600
Coeficiente nominal de retracción autógena	$\varepsilon_{caso}(f_{cm28}) = -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm28}/f_{cm0}}{6 + f_{cm28}/f_{cm0}} \right)^{2.5} \times 10^{-6}$	
	$\varepsilon_{caso}(f_{cm28})$	-0.007%
Función que describe el desarrollo de la retracción autógena en el tiempo	$\beta_{as}(t) = 1 - \exp \left[ -0.2 \left( \frac{t}{t_1} \right)^{0.5} \right]$	
	$t_1$	1
	$\varepsilon_{cas} = \varepsilon_{caso}(f_{cm28})\beta_{as}(t)$	
	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{cas}(t)</math></b>
Retracción autógena	0	0.0000%
	4	0.0024%
	7	0.0030%
	14	0.0038%
	21	0.0043%
	28	0.0047%

Elaboración propia

Tabla 43  
Retracción total para el diseño con cemento tipo HE según el modelo CEB MC90-99

<b>Retracción total Cemento tipo I (MODELO CEB MC90-99)</b>		
	$\varepsilon_{sh}(t, t_c) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_c)$	
	<b>t (edad)</b>	<b><math>\varepsilon_{sh}(t)</math></b>
Retracción total	0	0.0000%
	4	0.0088%
	7	0.0113%
	14	0.0152%
	21	0.0178%
	28	0.0198%

Elaboración propia

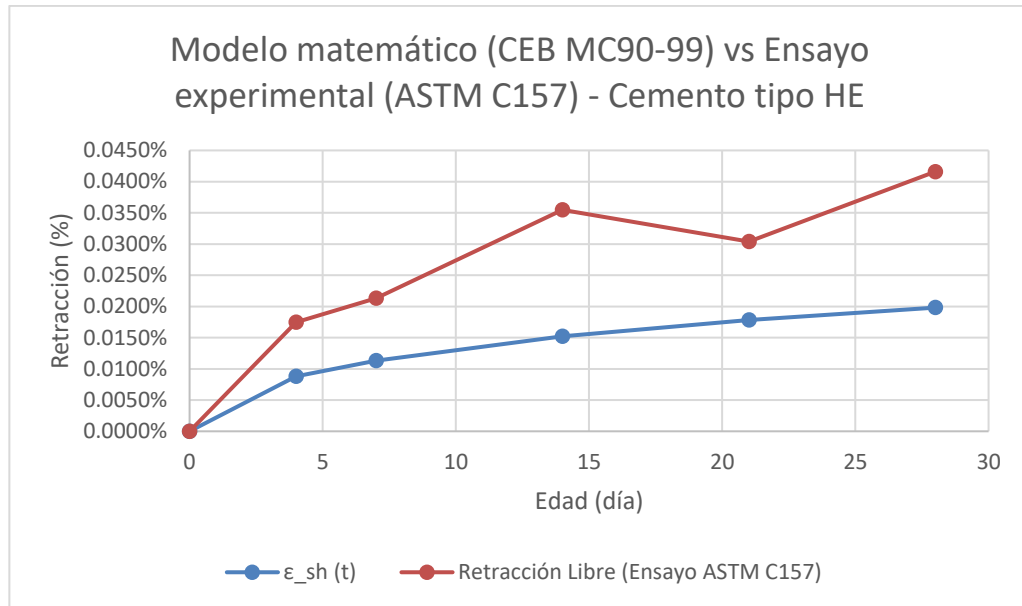


Figura 37 Gráfica de la curva de retracción del Modelo matemático (CEB MC90-99) y del ensayo experimental (ASTM C157) para el diseño con cemento tipo HE  
 Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 37 se observa que los resultados entre el modelo matemático CEB MC90-99 y el ensayo experimental la diferencia es menor a la de los otros diseños mostrados en la Figura 35 y Figura 36. Además, el comportamiento de ambas curvas de retracción tiene similar tendencia en periodos de análisis dentro de los 28 días de edad de las muestras. Lo que conlleva a interpretar que el modelo matemático utilizado se asemeja mejor con el diseño con cemento tipo HE.

## DISCUSIÓN

Utilizando el ensayo descrito por el método ASTM C157 – “Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto” se observó que existe una relación entre el comportamiento de la retracción libre con la aparición de fisuras en los anillos de concreto que simulan el ensayo de retracción restringida. La relación se caracteriza para cada diseño que aproximadamente en la edad donde se detecta un incremento de la retracción libre es cuando sucede la aparición de las fisuras en el amillo de concreto del mismo diseño y su aumento en ancho de éstas. Sin embargo, no se puede asumir que la fisuración es causada netamente por la retracción calculada en el ensayo de retracción libre, sino que también es afectada por otros factores internos del diseño y las condiciones en las que se realizó los ensayos experimentales como lo afirma el Comité ACI 224 (2007).

Al igual que en los ensayos realizados por Munizaga (2009) en su tesis de investigación, se evidencia que el uso de cementos puzolánicos generan una retracción mayor en los primeros 28 días de análisis tanto para los ensayos de retracción libre y retracción restringida, complementando a su conclusión que los diseños con cementos puzolánicos tienden a generar mayor pérdida de agua en su estado endurecido generando un posible aumento en la retracción que conllevaría a una fisuración no deseada, por lo que si es que se desea optar por el uso de cementos con puzolana se debe diseñar el concreto con los aditivos y proporciones de agregados adecuados para prevenir una posible fisuración.

En la tesis elaborada por Coaila & Loayza (2015) en Arequipa obtuvieron en el ensayo de retracción libre valores a los 28 días de 0.069% a 0.072% utilizando una *a/c* de 0.45 a 0.40 respectivamente con diseños con cemento tipo IP del proveedor Yura, a lo que se puede contrastar con la presente investigación que para el diseño con cemento IP se obtuvo una retracción de hasta 0.0723% a los 28 días con una relación de *a/c* 0.42. Se podría deducir que los valores obtenidos tienen concordancia al utilizar condiciones de diseño similares con respecto al tipo de cemento y relación *a/c*.

El Comité ACI 209 (2008) propone distintos modelos matemáticos para el cálculo de la retracción de especímenes de concreto durante un tiempo de análisis. Dado que el modelo CEB MC90-99 se acomoda mejor lo buscado tanto como los datos de ingreso y los resultados deseados se optó por modelar la retracción por los 28 días de análisis para cada diseño y compararlos con los resultados obtenidos del ensayo experimental de retracción libre. Obteniéndose que los valores experimentales son mayores en todos los casos que los valores obtenidos con el modelo matemático con la salvedad que el diseño que presenta una tendencia similar de retracción es el diseño con cemento HE.

Para Cárcamo & Mancila (2013) en su investigación realizada en Colombia donde también buscó correlacionar el ensayo experimental de la retracción libre indicado por la ASTM y el modelo matemático CEB MC90-99 propuesto por el ACI, obtuvo también datos de retracción mayores en la etapa experimental que en la teórica lo que conllevaría a tener una percepción de que el modelo matemático propuesto se limita al cálculo de la retracción por dos componentes, la retracción por secado y la autógena. Sin embargo, existen otros componentes de retracción que no los podría estar considerando en su cálculo como el “creep” que es módulo de fluencia lenta; así mismo, datos de ingreso que dependen del tipo y procedencia de los agregados, temperatura del ambiente, tipos y dosificación de aditivos empleados, tipos de cementos adicionados, entre otros parámetros que deberían ser considerados y generar un modelo que mejor se acomoda a los resultados experimentales.

## CONCLUSIONES

Al elaborar los ensayos de retracción libre y retracción restringida tomando como referencia lo indicado en los métodos ASTM C157 y ASTM C1581 para determinar si el tipo de cemento de tipo I, IP y HE influyen en la magnitud de fisuración de un diseño de mezcla elaborado para canales de concretos subterráneos. Con los resultados obtenidos se concluyó que efectivamente el tipo de cemento si influye en la fisuración de los elementos de concreto de un canal hidráulico subterráneo.

Para el ensayo de retracción libre según el ASTM C157, el diseño con cemento tipo HE presenta menor porcentaje de retracción libre entre los 3 diseños del estudio al finalizar el periodo de análisis de 28 días. Por otro lado, el diseño con cemento tipo IP presenta la mayor retracción obtenida entre los diseños de concreto siendo esta en promedio un 70% más a los 28 días de edad que la del diseño HE y un 28% mayor que la del diseño patrón con cemento tipo I.

Para el ensayo de retracción restringida el cual toma como referencia el método ASTM C1581 respecto a los anillos de concreto. Se evidenció una relación entre la aparición de las fisuras en los anillos con la evolución de la retracción libre donde las fisuras aparecen y se desarrollan durante un incremento porcentual de la curva de la retracción libre sobre todo para los diseños con cemento tipo I y IP. Sin embargo, para el caso del diseño con cemento tipo HE en el periodo donde se registra una expansión, aumento en longitud de las muestras del ensayo de retracción libre, las fisuras en el anillo tienden a no variar en ancho y recién cuando se reinicia la retracción las fisuras tienden ligeramente a aumentar su ancho demostrando que existe una relación entre los resultados de ambos ensayos de retracción.

Respecto al ancho promedio y cantidad de fisuras registradas en los anillos de concreto, en el anillo del diseño con cemento tipo HE se registraron 4 fisuras de ancho promedio 0.33mm a los 28 días siendo este el diseño con el menor número de fisuras observadas y menor ancho promedio de fisura. Por otro lado, el anillo del diseño con cemento tipo IP se registraron 6 fisuras con un ancho promedio de 0.50mm, siendo el diseño que presentó una fisuración mayor. Llevando a concluir

que el comportamiento de la magnitud de retracción y fisuración del diseño con cemento tipo HE es menor respecto a los otros diseños del estudio, siendo una buena opción para el diseño de mezcla de canales subterráneos de concreto similares.

Según los ensayos de retracción libre y retracción restringida realizados se puede deducir que el tipo de cemento si influye en la fisuración del concreto en diseños referentes a canales hidráulicos subterráneos con solicitaciones de performance y resistencia particulares. Teniendo como resultado que el diseño elaborado con cemento tipo HE tiene mejores resultados respecto a las tendencias de retracción y menor fisuración respecto a los otros diseños con cemento tipo I y IP.

Al comparar la retracción calculada en el modelo matemático CEB MC90-99 con los resultados del ensayo de retracción libre, se logra evidenciar que existe una clara diferencia donde este último es mayor a lo largo del tiempo de análisis. Lo que lleva a interpretar de que la retracción calculada por el modelo matemático se limita solamente a calcular la retracción por secado y la retracción autógena dejando de lado los otros componentes que podrían aumentar la retracción del elemento. Adicional a ello, el modelo matemático como lo comenta el Comité ACI 209 (2008) está elaborado con diseños de mezclas y agregados de origen distinto a los agregados utilizados en la presente investigación los cuales según algunos textos influyen también en la retracción de las estructuras de concreto y estas variables no son tomadas por el modelo matemático. Sin embargo, a pesar de lo comentado el diseño con cemento tipo HE tiende a tener el comportamiento de retracción más parecido con el modelo matemático.



## RECOMENDACIONES

Al observar un comportamiento de expansión de las muestras tipo viga estudiadas en las todas las gráficas de retracción libre de forma de un valle en un periodo corto de días, este comportamiento también se ha observado en otras investigaciones como las de Coaila & Loayza (2015) y Munizaga (2009) quienes han realizado los ensayos de retracción libre y también dentro de los primeros 28 días de análisis se presenta un ligero valle en sus gráficas. Por ello, puede ser objeto de estudio para investigaciones futuras sobre este tipo de comportamiento para diferentes variables en el diseño de mezcla.

Se recomienda considerar y estandarizar ensayos que puedan determinar la potencialidad de la fisuración de los diseños de concreto propuestos para canales subterráneos debido a que este tipo de estructuras tienen altos estándares de control de fisuración por ser medios de conducción de líquidos que no deben tener contacto con aguas de infiltración pudiendo generar problemas ambientales, sociales y económicos.

Los métodos para el cálculo de retracción de manera experimental indicados por el ASTM C157 y ASTM C1581 que corresponden tanto para los ensayos de retracción libre y retracción restringida respectivamente pueden ser utilizados para determinar la influencia de otros componentes en la fisuración como el tipo de agregado, el uso y proporción de aditivos o adiciones, la relación agua cemento, entre otros.

Para otro tipo de análisis se recomienda realizar los ensayos de retracción para periodos más largos de observación ya que nos dará datos del comportamiento de la retracción y fisuración de distintos diseños de mezcla, así determinar si en periodos con mayor cantidad de meses la retracción y fisuración son más o menos perjudiciales para una estructura en análisis y si los valores obtenidos están dentro de los estándares establecidos y estandarizados.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 224. (2013). *Joints in Concrete Construction (ACI 224.3R-95)*. American Concrete Institute. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ASTM Committee C490. (2017). *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. West Conshohocken: ASTM International.
- Avalo, J. (2016). Las normas técnicas de cemento y concreto en el Perú. *Cátedra - Concreto* (pág. 29). Lima: ASOCEM.
- BH CONCRETOS. (6 de Febrero de 2018). *¿Qué es la patología del concreto?* Obtenido de Medium Corporation: <https://medium.com/@bhconcretos/qu%C3%A9-es-la-patolog%C3%ADa-del-concreto-2ad73130d336>
- Blanco Elera, J. (2014). *Diagnóstico y reparación de los elementos de concreto en las oficinas de Petroperú*. Lima: Universidad Ricardo Palma.
- Broto, C. (2006). *Enciclopedia Broto de Patologías de la construcción*. Barcelona: Links International.
- Cabrerizo, F. (2017). Fisuras en el hormigón. *Journal boliviano de ciencias*, 18-20.
- Cárcamo, K. L., & Mancila, L. M. (2013). *Determinación de la curva inicial de retracción de fraguado de concretos elaborados utilizando adición de ceniza volante*. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana Seccionala Bucaramanga.
- Cementos YURA. (2018). *Ficha Técnica cemento industrial Tipo HE*. Arequipa: Yura.
- Cementos YURA. (2019). *Ficha técnica cemento multi-propósito tipo IP*. Arequipa: YURA.
- Coaila, N. A., & Loayza, J. D. (2015). *Influencia de la relación agua cemento y el agregado fino en la retracción y/o contracción para concretos en Arequipa*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.
- Colomé, D. (2018). *Metodología de investigación para cursos de posgrado en ingeniería* (Primera ed.). San Juan, Argentina: Ediciones Plaza.
- Comité ACI 209. (2008). *ACI 209.2R - Guía para el modelamiento y cálculo de la retracción y fluencia en el concreto endurecido*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

- Comité ACI 224. (2007). *Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures (ACI 224.1R)*. American Concrete Institute, Michigan. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Comité ACI 224. (2008). *Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón (ACI 224R-1R)*. American Concrete Institute. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Comité ACI 225. (2019). *Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Comité ASTM 209. (2013). *Terminología estándar relacionados al concreto y sus agregados*. West Conshohocken: ASTM International.
- Comité ASTM C01. (2007). *ASTM C490 - Uso de aparatos para la determinación del cambio de longitud de pasta de cemento endurecido, mortero y concreto*. West Conshohocken: ASTM International.
- Comité ASTM C09. (2017). *ASTM C157 - Cambio de longitud del mortero de cemento hidráulico endurecido y concreto*. West Conshohocken: ASTM International.
- Comité ASTM C09. (2018). *ASTM C1581- Método estándar para determinar la edad de agrietamiento y las características de tensión de tracción inducida de mortero y concreto bajo retracción restringida*. West Conshohocken: ASTM International.
- Comité ASTM C09. (2019). *ASTM C192 - Práctica estándar para elaborar y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio*. West Conshohocken: ASTM International.
- Comité ASTM C09. (2019). *ASTM C192M - Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio*. West Conshohocken: ASTM International.
- Comité ASTM C09. (2020). *ASTM C39 - Fuerza a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. West Conshohocken: ASTM International.
- Covarrubias, J. P. (s.f.). *Administración de fisuras mediante juntas de contracción*. Santiago de Chile: Litoral Ingeniería LTDA.
- García, E. (2011). *Estudio de retracción en una estructura real: estudio teórico y contrastación experimental*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Giani, R., Navarrete, B., & Bustos, J. (2008). La Retracción Autógena y su Relación con la Tendencia a la Fisuración a Temprana Edad en Pavimentos de Hormigón. *Revista de la Construcción*, 62-71.

- Gómez, J. G. (2015). *Retracciones en el concreto*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hermida, G., González, J., & Romero, A. (2005). *Agrieto luego existo, la retracción del concreto*. Bogotá.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico D.F.: McGRAW-HILL.
- ICCYC. (2005). *Tipos de cemento y sus usos*. Costa Rica: Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto.
- INACAL. (2016). *NTP 339.212.2016 - Método de ensayo estándar para determinar la edad del agrietamiento y características del esfuerzo de tensión inducida del mortero y concreto bajo contracción moderada*. Lima: INACAL.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2016). *Análisis del agrietamiento en concreto a través de la técnica de emisiones acústicas*. Secretaría de comunicaciones y transporte, Sanfandila.
- León, G. (2015). Determinación y evaluación de las patologías del concreto en el canal de regadío del distrito de Cabana. *In Crescendo Ingeniería*, 53-62.
- Lievano, M., & Gutierrez Torres, A. P. (2011). *Caracterización de fisuras en vigas de concreto reforzado con adición de fibras de polipropileno sometidas a flexión dinámica*. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana.
- Lopez, F., Rodriguez, V., Santa Cruz, J., Torreño, I., & Ubeda, P. (2004). *Manual de patología de la edificación*. Madrid, España: Departamento de Tecnología de la edificación (E.U.A.T.M).
- Müller, H. (1993). Considerations on the Development of a Database on Creep and Shrinkage Tests. En Z. Bažant, *Creep and Shrinkage of Concrete* (págs. 3-14). Barcelona.
- Munizaga, G. A. (2009). *Fisuración por retracción en hormigones: Influencia del tipo de cemento*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Osorio, R. T. (2016). *Comportamiento de Revestimientos de Concreto Reforzado de Sección Cuadrada en Túneles a Presión Interna*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- QSI Perú S.A. (2016). *Hoja técnica del NEOPLAST 8500 HP*. Lima: QSI Industrial.
- QSI Perú S.A. (2019). *Hoja Técnica del EUCO WR -75*. Lima: QSI Perú.
- Romero Esteban, A., Martínez Zarco, R., Ochoa Delgado, N., & Sánchez Gallardo, J. A. (28 de Noviembre de 2017). *Metodología general de análisis para la estimación del grado de severidad de patologías estructurales en un túnel*.

- Obtenido de <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/204724-Metodologia-general-analisis-estimacion-grado-severidad-patologias-estructurales-tunel.html>
- Sika. (2020). *Hoja técnica de producto SikaFume*. Quito: Sika.
- Toirac, J. (2004). *Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón. Origen y prevención*. República Dominicana: Ciencia y sociedad.
- UNACEM. (2012). *Ficha técnica - Cementos Sol Tipo I*. Lima: UNACEM.
- Vidaud, E. (2013). Fisuras en el concreto ¿Síntomas o enfermedad? *Construcción y Tecnología en concreto*, 20-23.
- Wang, H., Huang, H., Feng, Y., & Zhang, D. (2018). *Characterization of Crack and Leakage Defects of Concrete Linings of Road Tunnels in China*. Reston: ASCE-ASME.
- Ycaza, X. (17 de 09 de 2011). *La regla para medir fisuras*. Obtenido de Civilgeeks: <https://civilgeeks.com/2011/09/17/la-regla-para-medir-fisuras/>

## **ANEXOS**

MATRIZ DE CONSISTENCIA GENERAL

Problema	Objetivos	Hipótesis		Variables e Indicadores				Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis Nula	Hipótesis Alternativa	Variables	Dimensión	Instrumento de Medida	Fuente de información	TIPO DE INVESTIGACIÓN
¿Cómo influye el tipo de cemento con la fisuración del concreto en canales hidráulicos subterráneos	Identificar la influencia del tipo de cemento con la fisuración del concreto en canales hidráulicos subterráneos	No existe influencia del tipo de cemento con la fisuración del concreto en canales hidráulicos subterráneos	Existe influencia del tipo de cemento con la fisuración del concreto en canales hidráulicos subterráneos	Independiente	Cemento	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento	- Fichas Técnicas - Normas Vigentes
				Dependiente				
					Fisura	Retracción restringida	Observación - Tiempo	

Elaboración propia

MATRIZ DE CONSISTENCIA ESPECÍFICA

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
¿Cómo influye el tipo de cemento retracción libre del concreto en canales hidráulicos subterráneos?	Identificar la influencia del tipo de cemento con la retracción libre del concreto en canales hidráulicos subterráneos	No existe la influencia del tipo de cemento con la retracción libre del concreto en canales hidráulicos subterráneos	Existe la influencia del tipo de cemento con la contracción libre del concreto en canales hidráulicos subterráneos  Variación de longitud de las muestras tipo viga de concreto en el tiempo  milímetros (Longitud) Comparador de longitud	ASTM C150 NTP 334.165  DISEÑO DE INVESTIGACIÓN - Experimental cuantitativo
¿Cómo influye el tipo de cemento retracción restringida del concreto en canales hidráulicos subterráneos?	Identificar la influencia del tipo de cemento con la retracción restringida del concreto en canales hidráulicos subterráneos	No existe la influencia del tipo de cemento con la retracción restringida del concreto en canales hidráulicos subterráneos	Existe la influencia del tipo de cemento con la contracción restringida del concreto en canales hidráulicos subterráneos  Aparición y evolución de fisuras en el tiempo  mm (Ancho de fisura) Fisurómetro	ASTM C1581 NTP 339.212  DISEÑO DE INVESTIGACIÓN - Experimental cualitativo

Elaboración propia