

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Presión Lateral del Hormigón Fresco con Cementos Puzolánicos.**

**Juan Guido Calles Alajo**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

**INGENIERO CIVIL**

Quito, 25 de mayo de 2022

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Presión Lateral del Hormigón Fresco con Cementos Puzolánicos.**

**Juan Guido Calles Alajo**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Francisco Játiva, PhD.**

Quito, 25 de mayo de 2022

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Calles Alajo Juan Guido

Código: 00216042

Cédula de identidad: 0604085795

Lugar y fecha: Quito, 25 de mayo de 2022

## ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## UNPUBLISHED DOCUMENT

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

Para obtener una mejor optimización del encofrado, es primordial estimar la presión lateral del hormigón en su estado fresco. Una inadecuada construcción del encofrado genera problemas en la construcción tales como fallas en las paredes laterales del encofrado y pérdidas del material. Esta presión es determinada con las diferentes normativas establecidas una de ellas es el ACI-SP4, esta normativa se enfoca para cementos cuya composición no sea la puzolana. El ACI-SP4 establece un sistema de ecuaciones para el cálculo de la presión lateral del hormigón, una de las variables es el coeficiente químico mismo que varía según el tipo de cemento. En el Ecuador la mayoría de los cementos llevan en su composición puzolana, saber los efectos de la puzolana en la presión lateral es fundamental. Por ende, es necesario realizar investigaciones que permita determinar dicho coeficiente. En este proyecto se explora la configuración de la instrumentación, como también la obtención de datos de la presión lateral sobre el encofrado.

**Palabras clave:** hormigón, presión lateral, encofrado, cemento, instrumentación, puzolana, presión hidrostática.

## ABSTRACT

In order to obtain a better optimization of the formwork, it is essential to estimate the lateral pressure of the concrete in its fresh state. An inadequate construction of the formwork generates problems in the construction such as failures in the lateral walls of the formwork and material losses. This pressure is determined with the different established standards, one of them is the ACI-SP4, this standard is focused on cements whose composition is not pozzolan. The ACI-SP4 establishes a system of equations for the calculation of the lateral pressure of concrete, one of the variables is the chemical coefficient, which varies according to the type of cement. In Ecuador, most of the cements have pozzolana in their composition; knowing the effects of pozzolana on lateral pressure is fundamental. Therefore, it is necessary to carry out research to determine this coefficient. This project explores the configuration of the instrumentation, as well as obtaining data on the lateral pressure on the formwork.

**Keywords:** concrete, lateral pressure, formwork, cement, instrumentation, pozzolan, hydrostatic pressure.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	12
1.3 OBJETIVOS .....	13
1.3.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	13
1.4 ACTIVIDADES .....	13
1.5 RESULTADOS.....	13
1.6 DEFINICIONES.....	14
<b>2. DESARROLLO DEL TEMA.....</b>	<b>15</b>
2.1 REVISIÓN DE LITERATURA .....	15
2.1.1 <i>Tipos de Cements</i> .....	15
I. <i>Cemento Portland</i> .....	15
II. <i>Cemento Pozolánico</i> .....	16
III. <i>Cemento Aluminoso</i> .....	17
IV. <i>Cemento Blanco</i> .....	17
V. <i>Cemento Cola</i> .....	17
2.1.2 <i>Propiedades del Hormigón Fresco</i> .....	17
a) <i>Consistencia</i> .....	18
b) <i>Dosificación</i> .....	19
c) <i>Homogeneidad</i> .....	19
d) <i>Masa Específica</i> .....	19
2.1.3 <i>Estimación de la Presión Lateral del Hormigón Fresco</i> .....	19
➤ <i>Envolvente de Presión Lateral</i> .....	21
➤ <i>Proceso de Consolidación</i> .....	22
➤ <i>ACI Committee 622</i> .....	25
➤ <i>Adam et al.</i> .....	26
➤ <i>CIRIA</i> .....	27
➤ <i>DIN 18218</i> .....	28
➤ <i>Gardner</i> .....	29
➤ <i>ACI-SP4</i> .....	30
2.1.4 <i>Investigaciones Previas</i> .....	32
2.2 MATRIZ DE EXPERIMENTOS .....	35
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS .....	36
2.3.1 <i>Materiales</i> .....	36
2.3.2 <i>Ensayos para Obtener la Dosificación del Hormigón Fresco</i> .....	38

❖ ASTM C136-06 Método Reglamentario de Prueba o Ensayo para Análisis de Agregado Fino y Grueso .....	38
❖ ASTM C128 Método de Ensayo Normalizado para Determinar Densidad, Densidad Relativa y la Absorción de los Áridos Finos .....	38
❖ ASTM C33 Especificaciones Estándar para Agregados para Concreto .....	38
❖ ASTM C127 Método de Prueba Estándar para la Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Agregado Grueso .....	39
2.3.3 Diseño de la Mezcla .....	39
○ Granulometría .....	39
○ Densidad Relativa y Porcentaje de Absorción .....	41
2.3.4 Metodología para Medición de la Presión Lateral del Hormigón .....	43
✓ Instrumentos .....	43
✓ Método .....	46
2.4 RESULTADOS .....	49
2.4.1 Dosificación del Hormigón Fresco .....	49
2.4.2 Costo de Fabricación de Columnas .....	50
2.4.3 Presión Lateral .....	51
• Presión Hidrostática .....	53
• Presión Lateral con Mortero .....	54
2.5 PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS .....	55
<b>3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>57</b>
3.1 CONCLUSIONES .....	57
3.2 RECOMENDACIONES .....	58
<b>4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>
<b>5. ANEXOS .....</b>	<b>61</b>
ANEXO 1 .....	61
ANEXO 2 .....	61
ANEXO 3 .....	64
ANEXO 4 .....	64
ANEXO 5 .....	65
ANEXO 6 .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> APLICABILIDAD DE LAS ECUACIONES PARA PRESIÓN LATERAL EN UNIDADES DEL SISTEMA INGLÉS. (INSTITUTE, 2014) .....	31
<b>TABLA 2.</b> APLICABILIDAD DE LAS ECUACIONES PARA LA PRESIÓN LATERAL EN UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL. (INSTITUTE, 2014) .....	31
<b>TABLA 3.</b> VALORES DEL COEFICIENTE QUÍMICO Cc. (INSTITUTE, 2014) .....	32
<b>TABLA 4.</b> VALORES DEL COEFICIENTE DE PESO UNITARIO Cw. (INSTITUTE, 2014) .....	32
<b>TABLA 5.</b> MATRIZ DE EXPERIMENTOS. (TAPIA, 2019) .....	35
<b>TABLA 6.</b> GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO .....	39
<b>TABLA 7.</b> GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO .....	40
<b>TABLA 8.</b> DENSIDAD RELATIVA AGREGADO GRUESO .....	42
<b>TABLA 9.</b> PORCENTAJE DE ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO .....	42
<b>TABLA 10.</b> DENSIDAD RELATIVA AGREGADO FINO .....	43
<b>TABLA 11.</b> PORCENTAJE DE ABSORCIÓN AGREGADO FINO .....	43
<b>TABLA 12.</b> DIMENSIONES DE LAS COLUMNAS .....	47
<b>TABLA 13.</b> ALTURA DE COLOCACIÓN DE LOS SENSORES EN COLUMNAS .....	47
<b>TABLA 14.</b> ALTURA DE COLOCACIÓN DE LOS SENSORES EN TUBO 2 PULG .....	48
<b>TABLA 15.</b> DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN PARA COLUMNAS .....	49
<b>TABLA 16.</b> DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN PARA TUBO 2 PULG .....	49
<b>TABLA 17.</b> COSTOS DE ENCOFRADO .....	50
<b>TABLA 18.</b> COSTO DE COLOCACIÓN DEL ENCOFRADO .....	50
<b>TABLA 19.</b> COSTO MATERIALES DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN .....	50
<b>TABLA 20.</b> MEDICIÓN PRESIÓN HIDROSTÁTICA CON AGUA EN PSI Y KPA .....	51
<b>TABLA 21.</b> MEDICIÓN PRESIÓN LATERAL CON MORTERO EN PSI Y KPA .....	52
<b>TABLA 22.</b> VALORES DE DENSIDAD Y GRAVEDAD DEL AGUA .....	53
<b>TABLA 23.</b> COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA .....	53
<b>TABLA 24.</b> VALORES PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE PRESIÓN MÁXIMO TEÓRICO .....	54
<b>TABLA 25.</b> COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE LA PRESIÓN LATERAL CON MORTERO .....	54
<b>TABLA 26.</b> VALORES DE LA PRESIÓN LATERAL EN LAS 3 COLUMNAS .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> LOS 5 COMPONENTES DEL CONCRETO Y SUS VARIABLES. (BARRIGA, 2007).....	18
<b>FIGURA 2.</b> TÍPICA ENVOLVENTE DE PRESIÓN LATERAL Y CURVA EXPERIMENTAL DE DISEÑO. (ALMARAZ, 2010) .....	20
<b>FIGURA 3.</b> PRESIÓN VERTICAL DEL HORMIGÓN LUEGO DE LA VIBRACIÓN DE LA PRIMERA TONGADA. (ALMARAZ, 2010).....	22
<b>FIGURA 4.</b> DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN VERTICAL AL FINALIZAR EL LLENADO TENIENDO EN CUENTA SOLAMENTE EL EFECTO PRODUCIDO POR LA CONSOLIDACIÓN DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS. (ALMARAZ, 2010) .....	23
<b>FIGURA 5.</b> DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN VERTICAL AL FINALIZAR EL LLENADO TENIENDO EN CUENTA LOS EFECTOS DE CONSOLIDACIÓN E HIDRATACIÓN. (ALMARAZ, 2010) .....	24
<b>FIGURA 6.</b> COMPONENTES DE LA PRESIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL. (HARRISON, 1983) .....	24
<b>FIGURA 7.</b> ENVOLVENTE DE PRESIÓN LATERAL BILINEAL. (ALMARAZ, 2010) .....	25
<b>FIGURA 8.</b> CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO GRUESO .....	40
<b>FIGURA 9.</b> CURVA GRANULOMÉTRICA AGREGADO FINO.....	41
<b>FIGURA 10.</b> ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN .....	43
<b>FIGURA 11.</b> SENSOR OMEGA PX103U1 .....	44
<b>FIGURA 12.</b> ACONDICIONADOR DE SEÑAL.....	44
<b>FIGURA 13.</b> SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	45
<b>FIGURA 14.</b> CABLES CA-6PC24-3-015. ....	45
<b>FIGURA 15.</b> ACOPLER PARA SENSORES .....	46
<b>FIGURA 16.</b> COLOCACIÓN DE SENSORES EN COLUMNAS .....	48
<b>FIGURA 17.</b> COLOCACIÓN DE SENSORES EN TUBERÍA 2 PULG.....	48
<b>FIGURA 18.</b> GRAFICA DE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA TEÓRICA VS EXPERIMENTAL.....	53
<b>FIGURA 19.</b> GRAFICA DE LA PRESIÓN LATERAL TEÓRICA VS EXPERIMENTAL .....	54
<b>FIGURA 20.</b> COLOCACIÓN DE COLUMNAS EN LABORATORIO DE LA USFQ .....	61
<b>FIGURA 21.</b> COLOCACIÓN DE COLUMNA EN LABORATORIO DE LA USFQ.....	64
<b>FIGURA 22.</b> OBSTRUCCIÓN DEL AGREGADO GRUESO EN LOS SENSORES .....	64

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

En la actualidad, el hormigón es el material compuesto más usado en construcción cuya estructura se basa en áridos gruesos, finos, cemento y agua. La presión y el peso del hormigón son factores que condicionan el dimensionamiento del encofrado, la presión del hormigón en una columna será diferente a la presión que se ejerce en la losa debido a la presión hidrostática ejercida sobre los elementos verticales. Se emplean varios tipos de encofrado los cuales se clasifican en encofrados de uso múltiple y encofrados de un solo uso. (INEN, 1977)

Actualmente en el Ecuador, el método que estima la presión lateral del hormigón se basa en ecuaciones estándar obtenidas de normativas como el ACI-SP4, sin embargo, el uso de cementos puzolánicos en el país hace que estas ecuaciones no sean directamente aplicables, por lo que se necesita de experimentos que ayuden a estimar la presión lateral del hormigón fresco sobre el encofrado.

La presión lateral que ejerce el hormigón sobre el encofrado es de interés para constructores e ingenieros, la subestimación de la presión lateral produce graves problemas estructurales.

La determinación de la presión en el encofrado está dada por la multiplicación entre peso específico multiplicado por la altura de la estructura. Suponiendo que el hormigón siempre este en estado plástico. Este tipo de cálculo hidrostático sobreestima la presión a alturas superiores a 3 metros, ciertas evidencias sobre la presión muestran un bloqueo de esta a una profundidad determinada que depende del fraguado del hormigón, que al endurecerse la presión hidrostática del hormigón fresco se bloquea en una presión máxima y a partir de ahí no existe presión. (Piqueras, 2017)

A pesar de ser un tema tan fundamental e importante dentro de la construcción, en el país no existen estudios que comparen la eficiencia del cemento ecuatoriano entorno a las normativas extranjeras, generando fallas en la construcción y gastos innecesarios en la obra.

## **1.2 Justificación**

Existen varias fórmulas que permiten determinar la presión del hormigón, mismas que son implementadas tanto para cementos portland y otros tipos de cemento, pero no existe un coeficiente químico que involucre a los cementos puzolánicos. En el Ecuador el conocer el efecto que tendrá el cemento puzolánico sobre la presión lateral en los encofrados, ayudará a minimizar fallos sobre la misma.

Al hablar de presión lateral debemos dar importancia a los encofrados, Hurd establece que los objetivos al dimensionar encofrados seria: calidad, seguridad y costo. (Johnston, 2014)

“El uso de encofrados en estructuras de hormigón puede representar entre el 40 o 60 % de su costo” (Hurd, 2005). Es necesario conocer la presión lateral del hormigón con cementos puzolánicos minimizando fallos en el encofrado, con este análisis se establece el tema de investigación. En Ecuador la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015) regula la practica constructiva, dentro de estas normas no existe un capítulo donde se estime la presión lateral.

En este trabajo se da a conocer como los cementos puzolánicos afectan a la presión lateral en el encofrado.

### **1.3 Objetivos**

Los objetivos establecidos para el presente proyecto de titulación se muestran a continuación:

#### **1.3.1 Objetivos Generales**

Desarrollar una matriz de experimentos para la medición de la presión lateral del hormigón fresco.

Instrumentar y obtener datos de presión lateral en los ensayos establecidos.

### **1.4 Actividades**

Las actividades estipuladas a realizar son las siguientes:

Estudiar las ecuaciones para la estimación de la presión lateral del hormigón (ACI SP-4), y realizar una revisión de literatura de la parte experimental.

Establecer la matriz de experimentos.

Establecer un proceso sostenible el cual se enfoque en la construcción de encofrados los cuales serán colocados en las instalaciones de la USFQ.

Realizar Experimentos.

Análisis de los datos obtenidos en campo.

### **1.5 Resultados**

Los resultados que se espera tener de este trabajo de titulación son los siguientes:

Medición de la presión lateral en especímenes en los laboratorios de la USFQ.

Análisis de datos y determinación de la aplicabilidad del experimento en

Laboratorio.

## 1.6 Definiciones

**Presión:** “Se lo define como la división entre la fuerza para el área unitaria. Dicha fuerza actúa perpendicular a la superficie del área” (Giancoli, 2006)

**Presión Hidrostática:** Considera al hormigón en estado fresco como un fluido, estableciendo que al dimensionar el encofrado el mismo debe soportar la presión lateral con igual distribución hidrostática que un líquido de la misma densidad que el hormigón esta densidad rodea entre 2300-2500  $\frac{kg}{m^3}$ . (Soto, 2019)

**Encofrado:** “Elemento auxiliares destinados al moldeo de hormigones, siendo su misión contener y soportar el hormigón fresco hasta su endurecimiento sin experimentar deformaciones dándole la forma deseada” (Piqueras, 2017)

**Hormigón:** “Es un material constituido por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agregado grueso o piedra, agregado fino o arena, agua y opcionalmente aditivos, que inicialmente denota una estructura plástica y moldeable que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes” (Benites, 2011)

**Fraguado:** “Este término es implementado para describir la rigidez de la pasta del cemento, se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido adquiriendo cierta resistencia este proceso va acompañado de cambios en la temperatura” (Barriga, 2007)

**Cemento:** “Es un material finamente pulverizado que no es en si mismo conglomerado, sino que desarrolla la propiedad conglomerada como resultado de la hidratación es decir por las reacciones químicas entre minerales del cemento y el agua” (Monteiro, 1998)

**Presión Efectiva:** “Se transmite a través de los contactos entre partículas, la magnitud de la presión en los contactos depende de la relación entre área total en un corte cualquiera y el área que aquellos ocupan”. (Borfitz, 2008)

## 2. DESARROLLO DEL TEMA

### 2.1 Revisión de Literatura

#### 2.1.1 Tipos de Cementos

Existen varios tipos de elementos básicos en la construcción, entre ellos el cemento mismo que posee una clasificación variada:

##### I. Cemento Portland

También conocido como cemento tipo 1-RTCR cumple con las especificaciones de la norma ASTM C150, es un cemento hidráulico formado al pulverizar Clinker y una o más formas de sulfato de calcio. (Amador, 2016) Dicho cemento se subclasifica en:

**Tipo I:** cemento normal obtenido al mezclar Clinker con yeso, utilizado en un gran porcentaje de obras civiles teniendo una mayor compatibilidad con los materiales de construcción. (UMACON , 2021)

**Tipo II:** cemento modificado utilizado en obras de altos volúmenes de concreto expuesto moderado contenido de cloruros y sulfatos, teniendo ventaja ante la corrosión y la degradación. (UMACON , 2021)

**Tipo III:** de resistencia elevada, destaca al elevar su resistencia inicial a niveles muy altos. Se lo obtiene al someter las partículas a una molienda para tener un material más fino. (UMACON , 2021)

**Tipo IV:** al suprimir compuestos como el tipo C3A y C3S se consigue un cemento con bajo calor de hidratación, su resistencia se consigue al pasar un periodo de 30 días. (UMACON , 2021)

**Tipo V:** alta resistencia a sulfatos, utilizado en estructuras que están al contacto con la superficie (losas, tuberías) consiste en suprimir el contenido de C3A ya que dicho compuesto reacciona a sulfatos. (UMACON , 2021)

## II. Cemento Puzolánico

Al hablar de cementos puzolánicos se debe decir que es un cemento con resistencia a agentes químicos, se caracteriza por tener menos calor de fraguado, menor dilatación y por poseer mayor impermeabilidad que el cemento portland. Como su nombre lo indica este cemento se deriva de la puzolana que es una fina ceniza volcánica que toma el nombre de la localidad de Pozzuoli, situada en las faldas del volcán Vesubio.

El cemento puzolánico, está conformado por:

55 a 70 % de Clinker

30 a 45 % de puzolana

2 a 4 % de yeso

Es implementado en climas calurosos o para mezclas de grandes volúmenes, este cemento volcánico es utilizado para obras de alta permeabilidad. (Callejas, 1977)

Según el uso, la norma NTE INEN 490 del Instituto Ecuatoriano de Normalización clasifica a los cementos de la siguiente manera:

**Tipo IS Cemento Portland de Escoria de Altos Hornos:** cemento cuyo contenido es 25% y 70% de su masa cementante. Se puede considerar que el contenido de escoria de 70% de la masa trae beneficios en la resistencia y durabilidad. La escoria de alto horno es un subproducto resultado del hierro fundido que está conformado por silicato y aluminosilicatos de calcio. (Borges, 2015)

**Tipo IP Cemento Portland Puzolánico:** es un cemento hidráulico que contiene 15 a 50% de puzolana, resultado de la mezcla de cemento portland y material puzolánico esta unión se la puede efectuar en estado de Clinker y ser molido en conjunto. (Negra, 2005)

**Tipo IT Cemento Compuesto Ternario:** es un cemento hidráulico que consiste en una mezcla uniforme, estos cementos contienen un máximo de puzolana del 40% de su masa compuesta. (INEN, 2011)

### III. Cemento Aluminoso

Se obtiene de la mezcla pulverizada entre Sílice y Cal ambas al 40%, de color oscuro y un tiempo de fraguado rápido se caracteriza por su resistencia en ambientes agresivos, produce un elevado calor de hidratación. (Possehl, 2020)

También se encuentra variedad de cementos como:

### IV. Cemento Blanco

Es producido al pulverizar un Clinker balco de cemento portland, el color gris del cemento portland se debe a la presencia de fierro al disminuir este contenido se produce cementos ligeramente coloridos. Cuando el fierro en el cemento corresponde al 0.5%  $Fe_2O_3$  y el fierro retenido en  $Fe^{2+}$  el Clinker se torna blanco dicha condición se logra al elaborar cementos cuya arcilla esté libre de fierro y roca carbonato. (Monteiro, 1998)

### V. Cemento Cola

Mezcla preparada con cemento portland y resinas artificiales, se caracteriza por ser un producto en polvo que una vez mezclado con agua es implementado para adherencia de baldosas entre otros elementos. (Monteiro, 1998)

#### 2.1.2 Propiedades del Hormigón Fresco

El hormigón fresco está constituido por: cemento, agua, agregados fino y agregado grueso, pero en alguno de los casos se añade aditivos para mejorar sus propiedades.

Material	Ejemplo de variables
Cemento	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipo de cemento</li> <li>▪ Propiedades especiales</li> </ul>
Agregados	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Normales, ligeros, pesados.</li> <li>▪ Naturales, chancados.</li> <li>▪ Gradación, forma, textura.</li> </ul>
Agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Límites de componentes dañinos al concreto</li> </ul>
Adiciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Microsílice, ceniza volante, etc.</li> <li>▪ Pigmentos.</li> <li>▪ Fibras</li> </ul>
Aditivos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plastificantes, superplastificantes.</li> <li>▪ Acelerantes, retardantes, etc.</li> </ul>

*Figura 1: Los 5 componentes del concreto y sus variables. (Barriga, 2007)*

El cemento ayuda como ligante de los demás componentes del hormigón, que en su estado fresco exhibe características fisicoquímicas de cohesión y adherencia. (Beltran, 2020) La principal materia prima que se usa para la implementación del cemento se deriva del óxido de hierro, alúmina, cal y sílice dando como resultado elementos compuestos o llamadas fases las mismas que serán detalladas con sus respectivas abreviaturas:



El hormigón fresco al fraguar obtiene la resistencia y durabilidad que aporta rigidez a la estructura, se caracteriza por su estado plástico ya que se puede moldear. (BECOSAN, 2021)

Posee las siguientes características que son:

- a) **Consistencia:** ofrece la capacidad de deformarse y es medido a través del ensayo del cono de Abrams, dicho ensayo consiste en llenar un molde cónico

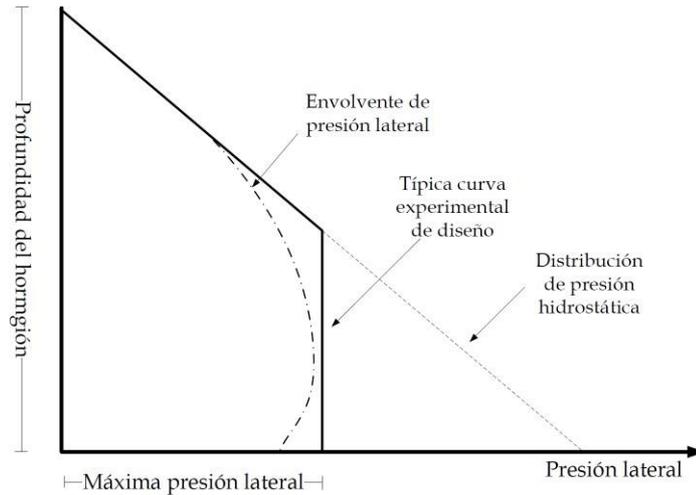
con la mezcla de hormigón y al desmontar el molde la mezcla produce un asentamiento.

- b) **Dosificación:** “Acción de medir por masa o volumen cada uno de los materiales componentes para producir una batchada, carga o parada de hormigón”. (INEN, 2002)
- c) **Homogeneidad:** cualidad de los componentes del hormigón fresco para distribuirse en toda su masa, se consigue a través de un buen amasado, transporte cuidadoso y colocación adecuada del mismo. (Rangel, 2019)
- d) **Masa Específica:** relación que existe entre la masa del hormigón y su volumen, se mide compactado o sin compactar.

### 2.1.3 Estimación de la Presión Lateral del Hormigón Fresco.

Al verter la mezcla de hormigón dentro del encofrado vertical, esta mezcla se proceder a vibrar garantizando la eliminación de vacíos para una correcta consolidación del hormigón. En obra se implementa vibradores los cuales son introducidos a una profundidad aproximadamente el largo de la cabeza del vibrador garantizando una distribución de la presión hidrostática. (Almaraz, 2010)

Gardner establece que a medida se va colocando tongadas la vibración no alcanza las capas inferiores, el hormigón adquiere resistencia al esfuerzo cortante generando rozamiento con las paredes del encofrado. Este proceso hace que la presión lateral a profundidad sea menor que la de un líquido con la misma densidad. (Johnston, 2014) La figura 2 muestra el envolvente de la presión lateral, la curva de diseño para encofrados verticales y la distribución hidrostática del hormigón.



*Figura 2. Típica envolvente de presión lateral y curva experimental de diseño. (Almaraz, 2010)*

Existe dos formas para determinar el envolvente de la presión lateral:

Formulación de un modelo teórico a partir de las propiedades mecánicas del hormigón en su estado fresco.

Desarrollo de fórmulas empíricas con los datos obtenidos en construcciones reales.

En la mayoría de los casos al hormigón fresco se lo asemeje como un suelo por lo tanto la relación entre la presión lateral y vertical de un material granular se lo interpreta de la siguiente manera:

$$P_h = K_H * P_v$$

Donde:

*P<sub>h</sub>: Presion Lateral*

*K<sub>H</sub>: Coeficiente de Proporcionalidad*

*P<sub>v</sub>: Presion Vertical*

El coeficiente de la presión vertical y presión lateral del hormigón fresco  $K_H$  no es una constante, el mismo varia desde 1 cuando el hormigón está en estado fluido y cuando está sometido a vibración hasta 0 cuando el hormigón gana resistencia.

➤ **Envolvente de Presión Lateral.**

Harrison a través de su teoría de presión de poros del agua, establece la representación de una pieza de hormigón sin armadura con un encofrado rígido y liso anulando la fricción entre el fluido y encofrado, por ende, la presión vertical a una altura  $h$  que este debajo de la superficie del hormigón será igual al peso específico del mismo por su altura. (Almaraz, 2010)

Definiendo a la presión vertical como:

$$P_v = \gamma_h * h = \sigma' + u$$

Donde:

$\sigma'$ : *Partículas de hormigón fresco*

$u$ : *Presión intersticial o presión de poros*

Y definiendo a la presión horizontal como:

$$P_h = (\lambda_c * \sigma') + u$$

Donde:

$\lambda_c$ : *Porcentaje de la presión vertical efectiva*

$u$ : *Presión intersticial o presión de poros*

Siendo los factores más importantes para controlar la presión lateral: la velocidad de dispersión de la presión de poros del agua, el desplazamiento de las partículas para estar en contacto, la hidratación del hormigón y la pérdida de lechada de cemento por el encofrado. Cuando el hormigón es colocado y vibrado en el encofrado DUNG-NING YU (Yu, 2000), considera en este momento que el comportamiento del hormigón es un fluido con partículas sólidas parcialmente suspendidas, por ende, la presión de poros ( $u$ ) sobrepasa la distribución hidrostática ( $u_0 = \gamma_{agua} * h$ ) en este instante la presión de poros ( $u$ ) es igual a la presión vertical ( $\gamma_h * h$ ) y la presión efectiva ( $\sigma'$ ) es 0.

Definiendo al exceso de presión como:

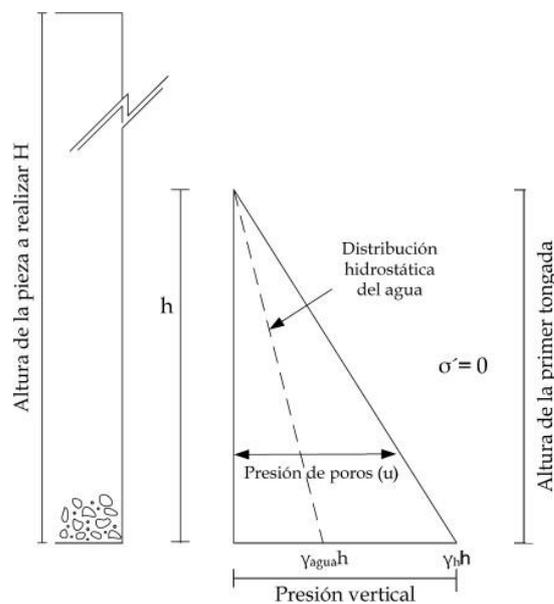
$$u_e = u_0 - u$$

Donde:

$u_0$ : Presión hidrostática del agua

$u$ : Presión intersticial o presión de poros

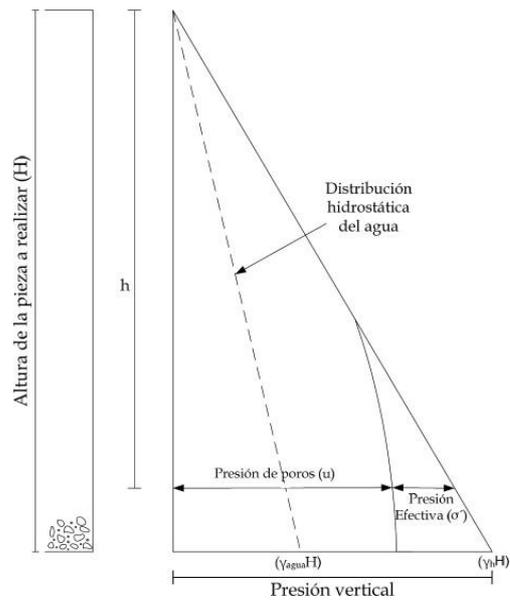
Este exceso de presión ( $u_e$ ) es una presión transitoria la cual determina la proporción de partículas sólidas que están suspendidas en agua.



**Figura 3.** Presión vertical del hormigón luego de la vibración de la primera tongada. (Almaraz, 2010)

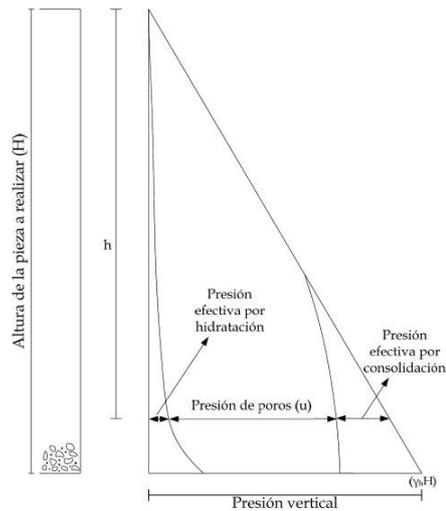
### ➤ Proceso de Consolidación.

Al hablar de la consolidación se debe tomar en cuenta el asentamiento, el mismo ocasiona que el agua libre fluya de forma vertical a través de la mezcla de hormigón y también de forma horizontal hacia las paredes del encofrado. Harrison dedujo que la velocidad de consolidación es proporcional del gradiente hidráulico, permeabilidad del hormigón, el encofrado, coeficiente de compresibilidad del hormigón y las fugas de la lechada por el encofrado. Estableciendo que dicho asentamiento forma una estructura capaz de soportar cargas verticales. (Harrison, 1983)



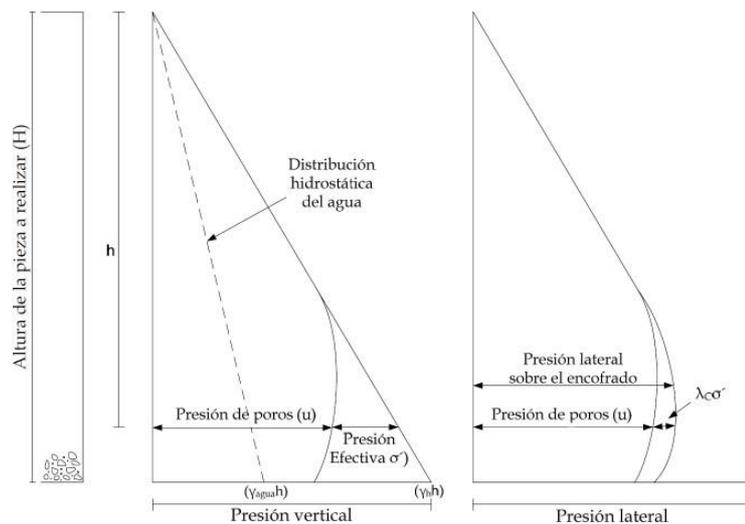
**Figura 4.** Distribución de presión vertical al finalizar el llenado teniendo en cuenta solamente el efecto producido por la consolidación de las partículas sólidas. (Almaraz, 2010)

En la parte superior la presión vertical es transmitida por la presión de poros ya que el proceso de consolidación no empieza, por otro lado, en la parte inferior el asentamiento de la mezcla se somete a un cambio de la densidad. Este proceso provoca contacto y lazos entre las partículas produciendo una transferencia de la presión de poros del agua y la presión efectiva. Pero a medida que la velocidad de llenado disminuye y la altura incrementa la curva de presión presenta una asíntota vertical teniendo en cuenta que el consumo de agua durante el periodo de inducción determina la máxima envolvente de presión. (Almaraz, 2010)



**Figura 5.** Distribución de presión vertical al finalizar el llenado teniendo en cuenta los efectos de consolidación e hidratación. (Almaraz, 2010)

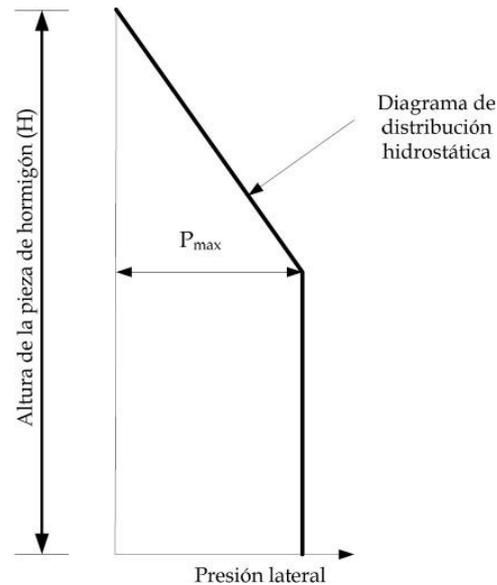
La combinación de la consolidación y el consumo de agua durante el periodo de inducción da inicio para la determinación de la presión lateral. La Figura 5 muestra la transferencia de la presión intersticial del agua a presión efectiva disminuyendo el exceso de presión justificando la diferencia de concentración del fluido a lo largo del encofrado permitiendo la aparición de la presión de poros de agua.



**Figura 6.** Componentes de la presión vertical y horizontal. (Harrison, 1983)

➤ **ACI Committee 622.**

El Instituto Americano de Concreto comité 622 en cuya normativa norteamericana determina los parámetros al problema de la presión lateral del hormigón y considera que: la velocidad de llenado, la temperatura y el efecto de consolidación son las principales variables.



*Figura 7. Envolvente de presión lateral bilineal. (Almaraz, 2010)*

El ACI determino la envolvente a la presión lateral bilineal con la siguiente formula:

$$P_{max} = C_1 * \frac{(1 + C_2R)}{T}$$

Donde:

*P<sub>max</sub>: Maxima presión lateral contra las paredes del encofrado.*

*C<sub>1</sub>: Función depende del peso específico del hormigón.*

*C<sub>2</sub>: Función depende de la consistencia de la mezcla.*

*R: Velocidad de llenado.*

*T: Temperatura del hormigón.*

En 1962 el comité ACI 622 propone una manera de calcular la envolvente de la presión lateral para cementos tipo I según la norma ASTM C150 y un asentamiento del cono de Abrams menor a 100 mm.

Para velocidades de llenado menor a  $2.14 \text{ m/h}$  en paredes y columnas:

$$P_{max} = 7.2 + \frac{785R}{17.78 + T}$$

Para velocidades de llenado entre  $2.14$  y  $3.0 \text{ m/h}$  en paredes:

$$P_{max} = 7.2 + \frac{1155}{17.78 + T} + \frac{244R}{17.78 + T}$$

Donde:

*P<sub>max</sub>: Máxima presión lateral contra las paredes del encofrado.*

*R: Velocidad de llenado.*

*T: Temperatura del hormigón.*

En los tres casos expuestos la norma específica que la máxima presión no debe ser mayor a la hidrostática.

➤ **Adam et al.**

Adam et al grupo de investigación francés cuyos ensayos de laboratorio con encofrados de 3 metros de altura, 2.5 m de ancho y 8 a 30 cm de espesor. Determino la velocidad de llenado, las características del agregado, la consistencia del hormigón, el tamaño y forma del encofrado llegando a estimar la presión lateral máxima del hormigón. Proponiendo una presión lateral bilineal de distribución hidrostática hasta llegar a un valor máximo de presión lateral siendo constante en la parte inferior del encofrado.

Definiendo las siguientes ecuaciones para velocidades de llenado menores a  $2.0 \text{ m/h}$ :

$$P_{max} = 19.62 + 12.26R \quad \text{Para } T \leq 5^{\circ}\text{C}$$

$$P_{max} = 19.62 + 9.81R \quad \text{Para } T = 15^{\circ}\text{C}$$

$$P_{max} = 19.62 + 8.34R \quad \text{Para } T \geq 25^{\circ}\text{C}$$

Para velocidades de llenado mayores a  $2.0 \text{ m/h}$ :

$$P_{max} = 40.22 + 1.96R \quad \text{Para } T \leq 5^{\circ}\text{C}$$

$$P_{max} = 35.32 + 1.96R \quad \text{Para } T = 15^{\circ}\text{C}$$

$$P_{max} = 32.37 + 1.96R \quad \text{Para } T \geq 25^{\circ}\text{C}$$

Donde:

*P<sub>max</sub>*: Maxima presión lateral contra las paredes del encofrado.

*R*: Velocidad de llenado.

*T*: Temperatura del hormigón.

#### ➤ CIRIA.

El organismo Construction Industry Research and Information Association realizó investigaciones con el fin de determinar el envolvente de la presión lateral siendo los principales parámetros: la velocidad de llenado, el tipo de cemento, la temperatura, la rugosidad y forma del encofrado. Estableciendo una presión bilineal siendo un limitante el endurecimiento del hormigón o la fricción con las paredes del encofrado.

Endurecimiento del hormigón:

$$P_{max} = 14.37 + 0.094d + 3.14R$$

Fricción contra las paredes del encofrado:

$$P_{max} = \frac{\gamma R t}{1 + c\left(\frac{t}{t_{max}}\right)} + 4.6R - 1.89$$

Donde:

$P_{max}$ : *Maxima presion lateral contra las paredes del encofrado.*

$d$ : *Dimension minima del encofrado.*

$R$ : *Velocidad de llenado.*

$\gamma$ : *Peso especifico del hormigon.*

$t$ : *Tiempo de inicio de llenado.*

$C$ : *Factor que depende de la consistencia del hormigon.*

$t_{max}$ : *Tiempo de endurecimiento del hormigon.*

Los valores de  $C$  y  $t_{max}$  son definidos por tablas obtenidas de forma experimental, siendo el coeficiente  $t_{max}$  un determinante para la temperatura del hormigón. Presión máxima lateral no puede ser mayor a la presión hidrostática de un líquido de igual densidad.

➤ **DIN 18218.**

La normativa alemana Deutsches Institut fur Normung (Instituto Alemán de Normalización) constituida en Berlín en 1917 establece el envolvente de la presión como bilineal determinando la presión máxima con las siguientes ecuaciones:

$$P_{max} = 21 + 5R \quad \text{Para Hormigon Rigido o Seco}$$

$$P_{max} = 19 + 10R \quad \text{Para Hormigon Plastico}$$

$$P_{max} = 18 + 14R \quad \text{Para Hormigon Blando}$$

$$P_{max} = 17 + 17R \quad \text{Para Hormigon Liquido}$$

Donde:

$P_{max}$ : *Maxima presion lateral contra las paredes del encofrado.*

$R$ : *Velocidad de llenado.*

Las ecuaciones son válidas para temperaturas de hormigón de 15°C con un peso específico de  $25 \text{ kN}/\text{m}^3$  y velocidades menores a  $7. \text{ m}/\text{h}$ .

➤ **Gardner.**

Gardner estableció un modelo de envolvente de la presión lateral bilineal con distribución hidrostática llegando a la máxima presión y constante en la parte inferior del encofrado. Llegando a determinar la siguiente ecuación:

$$P_{max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400R^{1/2}}{17.78 + T} + \frac{\alpha - 75}{10}$$

Donde:

*P<sub>max</sub>*: Maxima presión lateral contra las paredes del encofrado.

*h*: Profundidad que se introduce el vibrador.

*HP*: Potencia del vibrador.

*d*: Dimensión mínima del encofrado.

*R*: Velocidad de llenado.

*T*: Temperatura del Hormigón.

*α*: Asiento del cono de Abrams.

Gardner experimento con mezclas con plastificantes y cenizas volantes tipo F obteniendo un aumento de la presión lateral modificando la ecuación anterior a:

$$P_{max} = 24h_i + \frac{3000HP}{d} + \frac{d}{40} + \frac{400R^{1/2}}{17.78 + T} \left( \frac{100}{100 - \%F} \right) + \frac{\alpha - 75}{10}$$

Donde:

*%F*: Porcentaje de ceniza volante utilizada en sustitución del cemento.

➤ **ACI-SP4**

El Instituto Americano de Concreto (ACI) en su normativa ACI-SP4 establece las siguientes ecuaciones de la presión lateral para unidades del sistema inglés:

$$C_{CP} = wh$$

$$C_{CPmax} = C_W * C_C * (150 + \frac{900R}{T})$$

$$C_{CPmax} = C_W * C_C * (150 + \frac{43400}{T} + \frac{2800R}{T})$$

Y para unidades del sistema internacional las ecuaciones de la presión lateral son:

$$C_{CP} = \rho * g * h$$

$$C_{CPmax} = C_W * C_C * (7.2 + \frac{785R}{T + 17.8})$$

$$C_{CPmax} = C_W * C_C * (7.2 + \frac{1155}{17.78 + T} + \frac{244R}{17.78 + T})$$

Donde:

$C_{CPmax}$ : *Maxima presión lateral. (kPa)*

$C_C$ : *Coficiente químico.*

$C_w$ : *Coficiente del peso específico.*

$R$ : *Tasa de colocación. (m/h)*

$T$ : *Temperatura de colocación.*

$W$ : *Densidad de hormigón. ( $\frac{kg}{m^3}$ )*

$h$ : *Altura del elemento del hormigón. (m)*

Las ecuaciones mostradas con anterioridad dependen de parámetros los cuales serán mostrados a continuación, considerando parámetros como: asentamiento, profundidad de vibración, el tipo de elemento y la tasa de colocación del agregado.

**Tabla 1.** Aplicabilidad de las ecuaciones para presión lateral en unidades del sistema inglés. (Institute, 2014)

Revenimiento	Profundidad de vibración	Elemento	Tasa de colocación	Ecuación de Presión
> 7(in)	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	1
≤ a 7 (in)	> a 4 (ft)	Cualquiera	Cualquiera	1
≤ a 7 (ft)	≤ a 4(ft)	Columna	Cualquiera	2
		Muro ≤ a 14 (ft) de alto	< a 7 (ft/h)	2
		Muro > a 14 (ft) de alto	< a 7 (ft/h)	3
		Muro	7 a 15 (ft/h)	3
> a 15 (ft/h)	1			

**Tabla 2.** Aplicabilidad de las ecuaciones para la presión lateral en unidades del sistema internacional.

(Institute, 2014)

Revenimiento	Profundidad de vibración	Elemento	Tasa de colocación	Ecuación de Presión
> a 175 (mm)	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera	4
≤ a 175 (mm)	> a 1.2 (m)	Cualquiera	Cualquiera	4
≤ a 175 (mm)	≤ a 1.2 (m)	Columna	Cualquiera	5
		Muro ≤ a 4.2 (m) de alto	< a 2.1 (m/h)	5
		Muro > a 4.2 (m) de alto	< a 2.1 (m/h)	6
		Muro	2.1 a 4.5 (m/h)	6
			> a 4.5 (ft/h)	4

Como se observa la ecuación también depende del coeficiente relacionado al cemento, dicho coeficiente químico depende de la escoria y ceniza volante que exista en el cemento en la siguiente tabla 3 se establece los coeficientes que se implementaran por cada tipo de cemento.

*Tabla 3. Valores del Coeficiente Químico Cc. (Institute, 2014)*

Tipo de Cemento	Escoria	Ceniza Volante	Retardante	Cc
I, II o III	No	No	No	1.0
			Incluye	1.2
Cualquiera	< al 70%	< al 40 %	No	1.2
			Incluye	1.4
	≥ al 70 %	≥ al 40 %	No	1.4
			Incluye	1.5

La densidad del hormigón también forma parte de los parámetros de las ecuaciones establecidas por el ACI-SP4, la influencia de la densidad en la presión lateral se determina en la tabla 4 tanto para el sistema inglés e internacional.

*Tabla 4. Valores del Coeficiente de Peso Unitario Cw. (Institute, 2014)*

Sistema Ingles		Sistema Internacional	
Densidad del Hormigón (lb/ft <sup>3</sup> )	Cw	Densidad del Hormigón (kg/m <sup>3</sup> )	Cw
w < 140	0.5(1+(w/145 lb/ft <sup>3</sup> )) pero no menor a 0.8	p < 2240	0.5(1+(p/2320 kg/m <sup>3</sup> )) pero no menor a 0.8
140 ≤ w ≤ 150	1	2240 ≤ p ≤ 2400	1
w > 150	w/145 lb/ft <sup>3</sup>	p > 2400	p/2320 kg/m <sup>3</sup>

#### 2.1.4 Investigaciones Previas

- **Análisis de los métodos de cálculo de la presión del hormigón fresco sobre los encofrados.**

Sebastián Beltrán (Beltran, 2020), en su investigación recalca que el hormigón puede llegar a generar presiones considerables dependiendo de la altura de los elementos estructurales, optando por realizar una revisión de códigos e investigaciones que posean información sobre la presión lateral del hormigón. Posteriormente se

analizó formulas y diseños de encofrados con métodos de esfuerzos admisibles, dado que en la normativa ecuatoriana (NEC) no existe un análisis de la presión lateral del hormigón y en obra se realiza de forma empírica. Se proyecta un código que estime la presión en unidades del sistema internacional para el diseño de muros o columnas con encofrados de madera obteniendo información concreta para un diseño adecuado de las mismas.

- **Empuje lateral del hormigón fresco sobre elementos de encofrado vertical: estudio experimental y desarrollo de un modelo empírico.**

Adrián Santilli (Almaraz, 2010), dice en su tema que para el diseño de encofrados verticales se considera valores de la presión lateral del hormigón en su estado fresco, la solución más conservadora es la presión hidrostática cuya implementación genera encofrados rígidos y de elevados costos. Por ende, un conocimiento de las características que influyan a los encofrados para su diseño es de gran utilidad, pero la complejidad de dichas características genera modelos experimentales. Centrándose en la presión lateral del hormigón vibrado siendo el objetivo realizar recomendaciones para el cálculo de encofrados. Santilli obtuvo datos experimentales de la presión lateral llegando a optimizar el diseño de encofrados verticales, así como mejorar el conocimiento de los tiempos de desencofrado.

- **Presión lateral del hormigón fresco: Instrumentación y diseño de encofrado de muro.**

Vanessa Rodríguez (Rodríguez, 2021), por otro lado, en su tema de investigación recalca la importancia de estimar la presión lateral del hormigón en estado fresco, dependiendo que factores como: la densidad, vibrado, asentamiento entre otros. El desconocimiento de este proceso actualmente genera problemas en la construcción, llegando a establecer fórmulas para determinar la presión lateral el ACI-SP4 establece

el coeficiente químico del cemento. En el Ecuador la implementación de cementos puzolánicos tipo IP es muy común pero no existe un coeficiente que estime dicho coeficiente estableciendo una investigación que nos ayude a determinarlo. Rodríguez establece una configuración de instrumentos para establecer la presión lateral y el diseño de un sistema de encofrado para muros.

- **Empuje lateral del hormigón fresco en encofrados.**

Paul Brito (Brito, 2017), establece que el peso y la presión son los factores que condicionan las dimensiones del encofrado, la presión existente en una estructura es semejante a la presión de un fluido de la misma densidad que el hormigón, pero la presión hidrostática sobre elementos estructurales verticales es la pauta de investigación ya que la presión en la parte superior del elemento será menor a la presión que genera en la parte inferior. Siendo el objetivo determinar los parámetros para predecir dicha presión sobre el encofrado y establecer un modelo que cumpla con las características adecuadas para tener una buena seguridad en construcción.

- **Presión lateral del hormigón fresco: calibración de instrumentos y obtención de datos.**

Juan Sandoval (Sandoval, 2021), en su trabajo de titulación determina que la presión lateral es un tema de discusión y de gran importancia para el diseño de elementos de encofrado vertical, llegando a establecer instrumentaría que permita determinar dicha presión. Mediante sensores se obtendrán datos que serán procesados con el fin de obtener resultados que muestren la diferencia entre los factores que influyen sobre la presión lateral. Siendo el objetivo la medición directa de la presión sobre el encofrado comprobando que la instrumentaría adquiera datos con precisión para una mayor adecuación en obra reduciendo así fallos en elementos estructurales.

## 2.2 Matriz de Experimentos.

La matriz de experimentos implementada para este proyecto de titulación será la siguiente:

*Tabla 5. Matriz de Experimentos. (Tapia, 2019)*

<b>Grupo</b>	<b>Elemento</b>	<b>Altura</b>	<b>Revenimiento</b>	<b>Vibrado</b>	<b>Tasa de Colocación</b>	<b>Uso de Retardante</b>
LR	1ª	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	< 2.1 m	Si
	1B	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	< 2.1 m	Si
LN	2ª	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	< 2.1 m	No
	2B	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	< 2.1 m	No
HR	3ª	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	> 2.1 m	Si
	3B	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	> 2.1 m	Si
HN	4ª	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	> 2.1 m	No
	4B	< 4.2 m	< 175 mm	< 1.2 m	> 2.1 m	No

Con la finalidad de obtener datos que contribuyan al cálculo de la presión lateral, se implementa sensores que determinen la presión en puntos estratégicos del encofrado. Las variables que se toman en cuenta será la tasa de colado, profundidad de vibrado del hormigón, revenimiento y el uso de retardantes. En la Tabla 5 se observan los valores que influyen para este experimento, como también se muestra las tasas de vertido y la implementación de retardante para cada caso.

## 2.3 Materiales y Métodos.

### 2.3.1 Materiales

Los materiales utilizados en este proyecto de titulación son:

- **Agregado Grueso:**

Se le conoce como agregado grueso al material que proviene de la desintegración de la roca volcánica y que por su tamaño es retenido en el tamiz número 4. Se caracteriza por poseer partículas resistentes, es decir soportan cambios climáticos. El material utilizado en el experimento es obtenido en la empresa Holcim una piedra #67 que cumple la norma NTE INEN 872.

- **Agregado Fino:**

Se lo conoce como agregado fino al material obtenido al desintegrar la roca volcánica y que sus partículas pasen por el tamiz 3/8" y retenido en el tamiz número 200. Se caracteriza por ser arena manufacturada, proceso de tres o más trituraciones. El material utilizado en el experimento es obtenido en la empresa Holcim.

- **Cemento:**

El material utilizado en el experimento es Cemento Selvalegre es un cemento puzolánico tipo IP que cumple con los requisitos de la norma NTE INEN 490, posee características de resistencia a la compresión en todas las edades, llegando a obtenerse resistencias de 35 y 50 Mpa.

- **Tablas de Encofrado:**

Las tablas de encofrado sirven como paneles de columnas, vigas, etc. La madera utilizada para este material de construcción es el laurel, cuyas dimensiones son 2.4 m de altura y 0.30 cm de ancho.

- **Cuartones:**

Se los conoce como cuartones generalmente de pino silvestre, son implementados en la construcción y de dimensiones 3 x 5 cm.

- **Puntales:**

Los puntales son material de construcción su principal funcionamiento es dar soporte a una carga, el tipo de madera implementado es el pino de altura variada que oscila entre los 3 y 6 metros.

- **Clavos de Madera y Tornillos de Hormigón:**

Los clavos de madera son implementados para la construcción y la carpintería, existen dos tipos de clavos con y sin punta siendo un objeto delgado y alargado con punta filosa. Por otro lado, los tornillos de hormigón poseen un material endurecido con el fin de sostener objetos sobre el concreto.

- **Tubo de Agua 2 Pulgadas:**

De uso industrial de alta resistencia para conexiones de desagüe o agua, brinda un ajuste preciso sin fugas de gran resistencia a las fracturas por impacto. Dicho tubo es implementado para agua fría y en sus extremos se realiza roscas para unión con sus diferentes acoples.

- **Tee Polipropileno 2 Pulgadas:**

Se implementa para conexión entre tubos, de acoplamiento libre posee un anillo de goma cuya función es impedir la fuga de líquidos logrando una unión eficaz.

- **Neplo 2 Pulgadas Hembra a 1 Pulgada Macho:**

El buje de reducción implementado en edificios e industria utilizado para en conexiones de agua caliente o fría.

### **2.3.2 Ensayos para Obtener la Dosificación del Hormigón Fresco.**

#### **❖ ASTM C136-06 Método Reglamentario de Prueba o Ensayo para Análisis de Agregado Fino y Grueso.**

El ASTM C136 implementa un método para la separación de partículas de diferente tamaño mediante un sistema de tamizado, dicho método requiere de una columna de mallas de alambre que son colocados desde la abertura más grande hasta la más pequeña y en la base se coloca un molde que retiene el agregado. (ASTM, 2005)

#### **❖ ASTM C128 Método de Ensayo Normalizado para Determinar Densidad, Densidad Relativa y la Absorción de los Áridos Finos.**

El ASTM C128 este método se basa en la determinación de la densidad de una cantidad determinada de partículas de agregado fino, la densidad relativa y la absorción del agregado. Para dicho el agregado se lo somete a procedimientos de secado en horno (OD), saturada superficialmente seca (SSD) y de densidad aparente. Determinando la densidad esencialmente solida de una cantidad grande de agregado obteniendo un valor representativo de la muestra. (ASTM, 2021)

#### **❖ ASTM C33 Especificaciones Estándar para Agregados para Concreto.**

En dicha especificación se define los requerimientos de la granulometría y la calidad de los agregados grueso y finos que serán implementados en el concreto, también se puede ser implementada en proyectos para definir la calidad de los agregados, tamaño nominal máximo de los agregados y otros requerimientos de granulometría. (ASTM, 2016)

❖ **ASTM C127 Método de Prueba Estándar para la Densidad, Densidad Relativa y Absorción de Agregado Grueso.**

Este método determina la densidad y densidad relativa del agregado grueso como también la absorción de este, determinando la densidad en porciones de un gran número de partículas de agregado. Dicho método de ensayo no está diseñado para ser utilizado con agregados finos. (ASTM, 2018)

**2.3.3 Diseño de la Mezcla.**

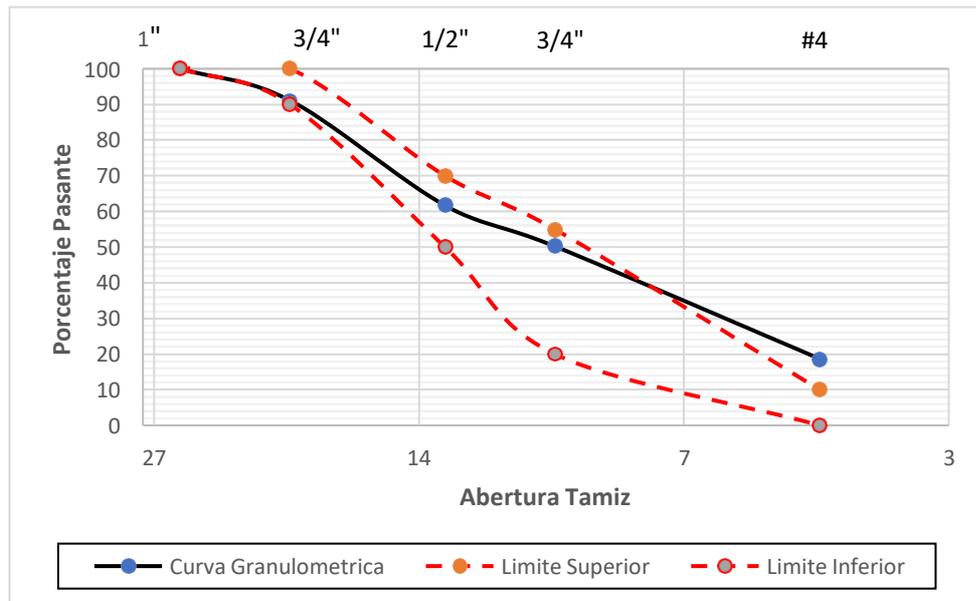
○ **Granulometría**

La selección de los agregados de una mezcla de hormigón es parte fundamental, ya sea que se trate de agregado grueso o fino este se obtendrá de alguna fuente natural como minas, playas, volcanes, etc. Para los respectivos procesos de ensayo granulométrico se opta por manejar con una muestra de agregado adecuado para dichos ensayos, también se clasifica el agregado por tamaño obteniendo una muestra de material homogéneo de fácil uso.

Los datos obtenidos para la granulometría del agregado grueso y fino se observan en las tablas a continuación:

*Tabla 6. Granulometría Agregado Grueso.*

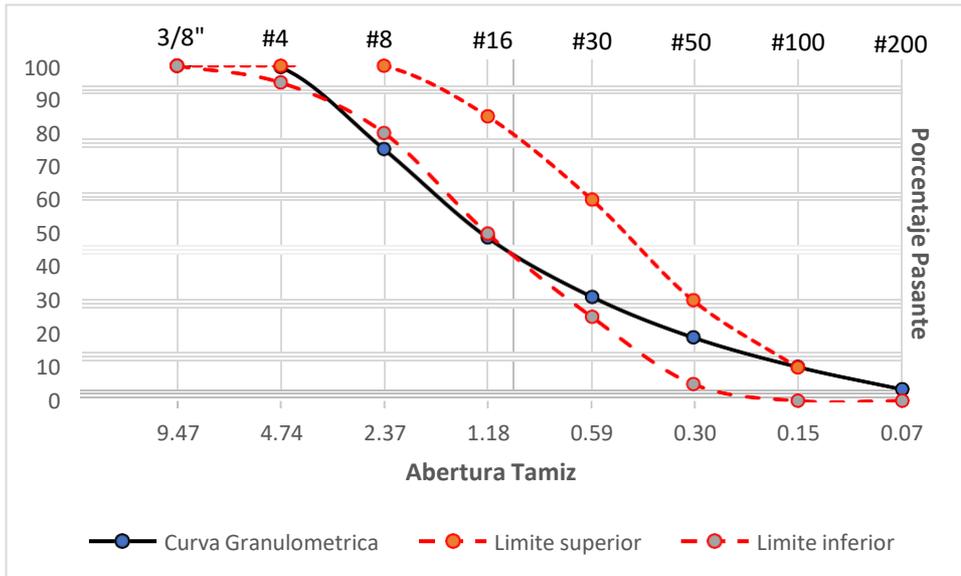
<b>Agregado Grueso</b>					
<b>Tamices</b>	<b>Abertura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>%Retenido</b>	<b>%Retenido</b>	<b>%</b>
<b>ASTM</b>	<b>mm</b>	<b>Retenido</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasante</b>
<b>1"</b>	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>¾"</b>	19.05	462.50	8.89	8.89	91.11
<b>1/2"</b>	12.70	1532.50	29.46	38.35	61.65
<b>3/8"</b>	9.53	595.50	11.45	49.79	50.21
<b>#4</b>	4.76	1642.50	31.57	81.36	18.64
<b>BASE</b>		969.50	18.64	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		5202.50	100.00	278.40	
<b>%Perdido</b>		0.02		<b>FM=</b>	2.78



*Figura 8. Curva Granulométrica Agregado Grueso.*

*Tabla 7. Granulometría Agregado Fino.*

Agregado Fino					
Tamices	Abertura	Peso (g)	%Retenido	%Retenido	%
ASTM	mm	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasante
<b>3/8"</b>	9 525.00	0.00	0.00	0.00	100.00
<b>#4</b>	4.76	2.50	0.41	0.41	99.59
<b>#8</b>	2.38	147.50	24.46	24.88	75.12
<b>#16</b>	1.19	159.00	26.37	51.24	48.76
<b>#30</b>	0.59	107.00	17.74	68.99	31.01
<b>#50</b>	0.30	73.00	12.11	81.09	18.91
<b>#100</b>	0.15	53.00	8.79	89.88	10.12
<b>#200</b>	0.07	40.50	6.72	96.60	3.40
<b>BASE</b>		20.50	3.40	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		603.00	100.00	513.10	
<b>%Perdido</b>		0.08		<b>FM=</b>	5.13



*Figura 9. Curva Granulométrica Agregado Fino.*

### ○ **Densidad Relativa y Porcentaje de Absorción**

Al hablar de densidad relativa se da a interpretar la comparación de la densidad del material con cualquier otra sustancia (agua) siendo este un solvente universal, este proceso se lo realiza tanto para el agregado grueso y fino.

El agregado fino se mezcla con una cantidad de agua equivalente al 6 % de su peso y luego secada en horno por un determinado tiempo dicho proceso es realizado con la norma ASTM C128, para el agregado grueso el proceso se simplifica ya que el agregado debe ser secado y pesado luego es sumergido en agua y secado en horno observando variaciones en sus propiedades físicas del material para este ensayo se toma como guía la norma ASTM C127.

Los datos obtenidos para la densidad relativa y porcentaje de absorción del agregado grueso y fino se muestran a continuación:

#### **Agregado Grueso**

**A:** Masa de muestra de ensayo secada en horno.

**B:** Masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca en aire.

**C:** Masa aparente de la muestra de ensayo saturada sumergida en agua.

$$\text{Densidad R} = \frac{A}{B - C}$$

*Tabla 8. Densidad Relativa Agregado Grueso.*

<b>A</b>	2818.500
<b>C</b>	1772.500
<b>B</b>	3001.000
<b>Densidad R</b>	2.294

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(B-A)}{A} * 100$$

*Tabla 9. Porcentaje de Absorción Agregado Grueso.*

<b>A</b>	2818.500
<b>C</b>	1772.500
<b>B</b>	3001.000
<b>%Absorción</b>	6.475

### **Agregado Fino**

**A:** Masa de muestra de ensayo secada en horno.

**R1:** Lectura inicial del nivel de agua en el matraz Le Chatelier mL.

**R2:** Lectura final del nivel de agua en el matraz de Le Chatelier mL.

**S:** Masa de la muestra en condiciones SSS proceso gravimétrico.

**S1:** Masa de la muestra en condiciones SSS proceso volumétrico.

$$\text{Densidad R} = \frac{S1\left(\frac{A}{S}\right)}{0.9975(R2 - R1) - \left(\left(\frac{S1}{S}\right)(S - A)\right)}$$

*Tabla 10. Densidad Relativa Agregado Fino.*

<b>A</b>	45.000
<b>R1</b>	0.800
<b>R2</b>	23.700
<b>S</b>	52.083
<b>S1</b>	52.083
<b>Densidad R</b>	2.855

$$\%Absorción = \left( \frac{S - A}{A} \right) * 100$$

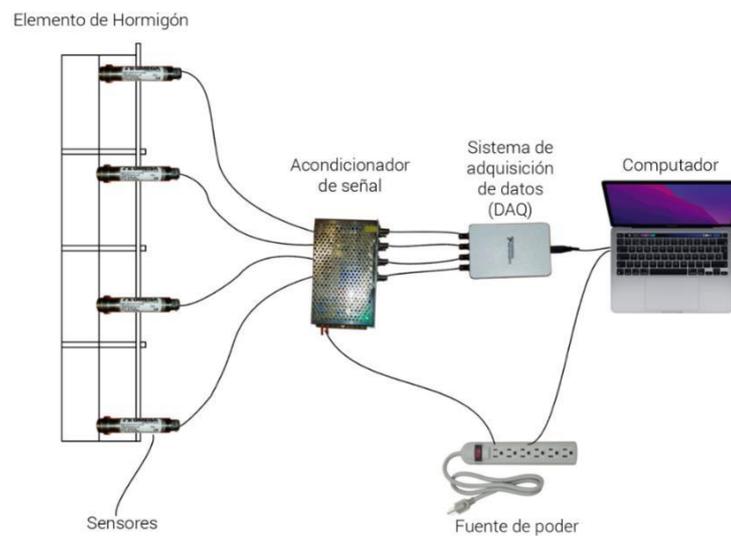
*Tabla 11. Porcentaje de Absorción Agregado Fino.*

<b>A</b>	45.000
<b>S</b>	52.083
<b>%Absorción</b>	15.740

### 2.3.4 Metodología para Medición de la Presión Lateral del Hormigón.

#### ✓ Instrumentos

La instrumentación utilizada para el presente proyecto consiste en los siguientes implementos:



*Figura 10. Esquema de Instrumentación.*

La Figura 10 muestra la configuración para el sistema de recolección de datos de la presión lateral.

**Sensor de presión PX103U1:** Marca OMEGA mide la presión de entre 0 y 25 psi.



*Figura 11. Sensor Omega PX103U1.*

**Acondicionador de Señal:** la función es acondicionar la señal proveniente del sensor, eliminando cualquier interferencia que se presente y que genere distorsión en los datos. Su función es transformar la señal de corriente a voltaje mediante las resistencias instaladas en el mismo.



*Figura 12. Acondicionador de Señal.*

**Sistema de Adquisición de Datos:** el DAQ es un dispositivo que permite interpretar los datos de voltaje para ser analizados en el software como valores de presión.



*Figura 13. Sistema de Adquisición de Datos.*

**Cables CA-6PC24-3-015:** permiten la conexión del sensor de presión al acondicionador de señal.



*Figura 14. Cables CA-6PC24-3-015.*

**Acoples:** permite sostener los sensores consta de un lado roscable que se introduce en el material de molde para luego sostener el sensor, la fabricación de estos acoples fue por parte del laboratorio de ingeniera mecánica de la USFQ.



*Figura 15. Acoples para Sensores.*

**Computadora:** se implementa una laptop con el programa NI Signal Express para poder analizar los datos de presión que se obtienen con el sistema de adquisición de datos.

✓ **Método**

- **Software NI Signal Express**

Se requiere del uso de este software el cual actúa como traductor de los valores enviados por los sensores en forma de corriente transformado los a presión, la programación consiste en establecer la fuente de los datos DAQ con sus 4 canales establecidos, luego se aplica un filtro a todos los canales este filtro hace que todas las frecuencias que superen cierta magnitud no sean consideradas.

Para proceder a aplicar una conversión de tipo lineal conforme la hoja de calibración del fabricante.

- **Sistema de Acoplamiento**

El sistema de acoplamiento es enroscado el elemento del encofrado, dicho proceso es realizado sobre el tablero de encofrado previamente perforado con un sacabocados de diámetro 32 mm.

- **Especímenes**

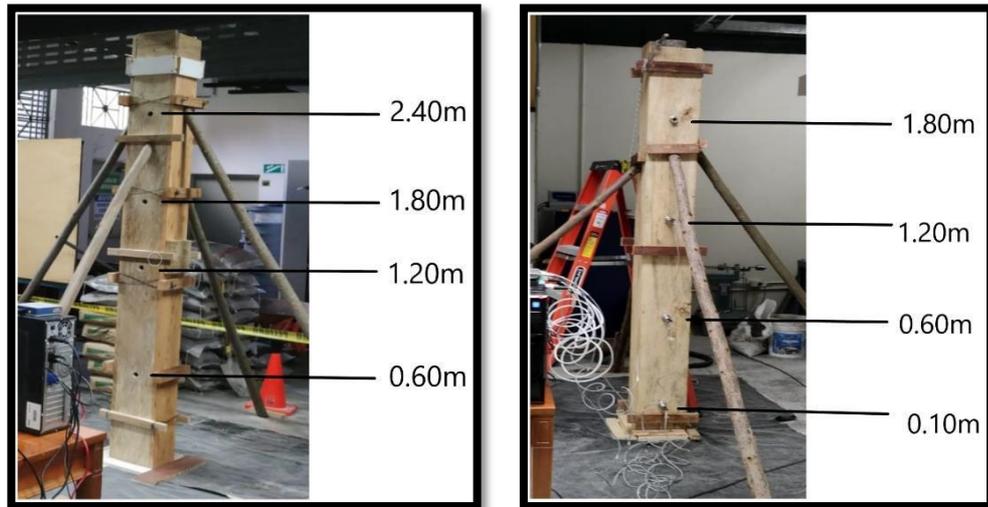
Los elementos estructurales en el cual se realizaron las mediciones corresponden a 4 columnas y a un diseño de tubo de dos pulgadas los cuales fueron previamente fabricadas y aseguradas en el laboratorio de materiales de la USFQ, las dimensiones de las columnas son detallados en la Tabla 12, por otro lado, las alturas de colocación de los sensores tanto para las columnas como para el diseño de tubo son detallados en la Tabla 13 y Tabla 14 respectivamente.

*Tabla 12. Dimensiones de las Columnas.*

<b>Columnas (m)</b>	
<b>Altura</b>	2.5
<b>Ancho</b>	0.2

*Tabla 13. Altura de Colocación de los Sensores en Columnas.*

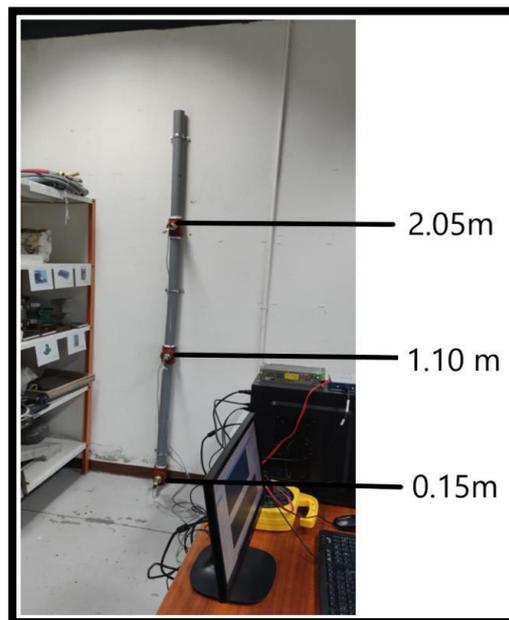
<b>Colocación de los Sensores (m)</b>		<b>Colocación de los Sensores Modificado (m)</b>	
<b>h1</b>	0.6	<b>h1</b>	0.1
<b>h2</b>	1.2	<b>h2</b>	0.6
<b>h3</b>	1.8	<b>h3</b>	1.2
<b>h4</b>	2.4	<b>h4</b>	1.8



*Figura 16. Colocación de Sensores en Columnas.*

*Tabla 14. Altura de Colocación de los Sensores en Tubo 2 Pulg.*

Colocación de los Sensores (m)	
<b>h1</b>	0.15
<b>h2</b>	1.1
<b>h3</b>	2.05



*Figura 17. Colocación de Sensores en Tubería 2 Pulg.*

## 2.4 Resultados.

### 2.4.1 Dosificación del Hormigón Fresco.

Para los siguientes ensayos de presión lateral la dosificación se dividió en dos partes, la Tabla 15 muestra la dosificación del hormigón fresco para columnas cuya dimensión se especifica en la Tabla 12. Por otro lado, la dosificación del mortero implementado para determinar la presión en la tubería de 2 pulgadas se muestra en la Tabla 16.

*Tabla 15. Dosificación del Hormigón para Columnas.*

<b>Dosificación del Hormigón para Columnas (1 m3)</b>		
<b>Ripio</b>	47.26	kg
<b>Arena</b>	40.78	kg
<b>Agua</b>	14.16	kg
<b>Cemento</b>	11.22	kg

*Tabla 16. Dosificación del Hormigón para Tubo 2 Pulg.*

<b>Dosificación del Hormigón en Tubo 2 Pulg (1 m3)</b>		
<b>Arena</b>	11.0386	kg
<b>Agua</b>	1.5761	kg
<b>Cemento</b>	2.9315	kg

### 2.4.2 Costo de Fabricación de Columnas.

Para el funcionamiento de una columna en el laboratorio de materiales de la USFQ, el costo de fabricación es de \$ 71.5 dicho valor es detallado en las Tablas 17,18 y 19:

*Tabla 17. Costos de Encofrado.*

<b>Costo de Encofrado de Madera de 1 Columna</b>			
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio por Unidad (\$)</b>	<b>Precio final (\$)</b>
<b>Tablas de Encofrado</b>	4 unidades	3	12
<b>Puntales</b>	4 unidades	2.75	11
<b>Cuartones</b>	1 unidad	2.5	2.5
<b>Clavos de Madera</b>	2 libras	2	4
<b>Tornillos de Hormigón</b>	20 unidades	0.2	4
<b>Total</b>			<b>33.5</b>

*Tabla 18. Costo de Colocación del Encofrado.*

<b>Costo de la Colocación del Encofrado en Laboratorio de 1 Columna</b>				
<b>Personal</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tiempo de Colocación (hr)</b>	<b>Precio por Hora</b>	<b>Precio final (\$)</b>
Personal de Construcción	2	2	4.5	<b>18</b>

*Tabla 19. Costo Materiales de la Mezcla de Hormigón.*

<b>Costo de la Mezcla de Hormigón para 1 Columna</b>			
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio por Unidad (\$)</b>	<b>Precio final (\$)</b>
<b>Ripio</b>	2 sacos	3	6
<b>Arena</b>	2 sacos	3	6
<b>Cemento</b>	1 saco	8	8
<b>Total</b>			<b>20</b>

### 2.4.3 Presión Lateral.

Los resultados obtenidos en laboratorio de la presión lateral de la tubería de 2 pulgadas se muestran a continuación:

*Tabla 20. Medición Presión Hidrostática con Agua en PSI y kPa.*

<b>Mediciones Presión Hidrostática en Tubo de 2 pulg</b>			
<b>Hora</b>	<b>Sensor 1 PSI (707040)</b>	<b>Sensor 2 PSI (707041)</b>	<b>Sensor 3 PSI (707042)</b>
<b>12:02:00</b>	0.893	-0.474	-0.277
<b>12:03:00</b>	1.080	-0.464	-0.260
<b>12:05:00</b>	1.440	-0.443	-0.241
<b>12:06:00</b>	1.770	-0.454	-0.251
<b>12:08:00</b>	1.983	-0.507	-0.312
<b>12:10:00</b>	2.331	-0.177	-0.298
<b>12:12:00</b>	2.652	0.185	-0.260
<b>12:14:00</b>	2.866	0.409	-0.305
<b>12:16:00</b>	3.086	0.633	-0.150
<b>12:17:00</b>	3.390	0.943	0.144
<b>12:18:00</b>	3.615	1.166	0.386
<b>12:20:00</b>	3.910	1.930	0.821

<b>Mediciones Presión Hidrostática en Tubo de 2 pulg</b>			
<b>Hora</b>	<b>Sensor 1 kPa (707040)</b>	<b>Sensor 2 kPa (707041)</b>	<b>Sensor 3 kPa (707042)</b>
<b>12:02:00</b>	6.157	-3.268	-1.910
<b>12:03:00</b>	7.446	-3.199	-1.793
<b>12:05:00</b>	9.928	-3.054	-1.662
<b>12:06:00</b>	12.204	-3.130	-1.731
<b>12:08:00</b>	13.672	-3.496	-2.151
<b>12:10:00</b>	16.072	-1.220	-2.055
<b>12:12:00</b>	18.285	1.276	-1.793
<b>12:14:00</b>	19.760	2.820	-2.103
<b>12:16:00</b>	21.277	4.364	-1.034
<b>12:17:00</b>	23.373	6.502	0.993
<b>12:18:00</b>	24.925	8.039	2.661
<b>12:20:00</b>	26.959	13.307	5.661

*Tabla 21. Medición Presión Lateral con Mortero en PSI y kPa*

<b>Mediciones Presión Lateral en Tubo de 2 pulg (Mortero)</b>			
<b>Hora</b>	<b>Sensor 1 PSI (707040)</b>	<b>Sensor 2 PSI (707041)</b>	<b>Sensor 3 PSI (707042)</b>
<b>14:40:00</b>	0.852	-0.398	-0.353
<b>14:45:00</b>	1.929	-0.472	-0.228
<b>14:46:30</b>	2.976	-0.529	-0.331
<b>14:48:00</b>	4.234	0.859	-0.267
<b>14:50:00</b>	4.823	1.696	-0.600
<b>14:51:30</b>	5.483	2.579	0.830
<b>14:53:00</b>	6.031	3.183	1.479
<b>14:55:00</b>	5.466	2.815	1.299
<b>15:00:00</b>	5.090	2.639	1.345
<b>15:05:00</b>	3.909	1.453	0.660
<b>15:08:00</b>	3.969	1.489	0.653

<b>Mediciones Presión Lateral en Tubo de 2 pulg (Mortero)</b>			
<b>Hora</b>	<b>Sensor 1 kPa (707040)</b>	<b>Sensor 2 kPa (707041)</b>	<b>Sensor 3 kPa (707042)</b>
<b>14:40:00</b>	5.874	-2.744	-2.434
<b>14:45:00</b>	13.300	-3.254	-1.572
<b>14:46:30</b>	20.519	-3.647	-2.282
<b>14:48:00</b>	29.192	5.923	-1.841
<b>14:50:00</b>	33.253	11.694	-4.137
<b>14:51:30</b>	37.804	17.782	5.723
<b>14:53:00</b>	41.582	21.946	10.197
<b>14:55:00</b>	37.687	19.409	8.956
<b>15:00:00</b>	35.094	18.195	9.273
<b>15:05:00</b>	26.952	10.018	4.551
<b>15:08:00</b>	27.365	10.266	4.502

Se procede a comparar los resultados obtenidos en las Tablas 20 y 21 con valores teóricos de la presión hidrostática del agua como también los valores teóricos de la presión lateral con mortero.

## Presión Hidrostática

Tabla 22. Valores de Densidad y Gravedad del Agua.

Densidad del Agua	1000	$\frac{kg}{m^3}$
Gravedad	9.81	$\frac{m}{s^2}$

Tabla 23. Comparación de los Valores de la Presión Hidrostática.

Presión Hidrostática en Tubo de 2 pulg (Agua)			
Sensores	Profundidad (m)	Presión Hidrostática (Teórica)	Presión Experimental
Inferior	2.600	25.506	-
Sensor 1 kPa (707040)	2.500	24.525	26.959
Sensor 2 kPa (707041)	1.600	15.696	13.307
Sensor 3 kPa (707042)	0.730	7.161	5.661
Superior	0.000	0.000	0.000

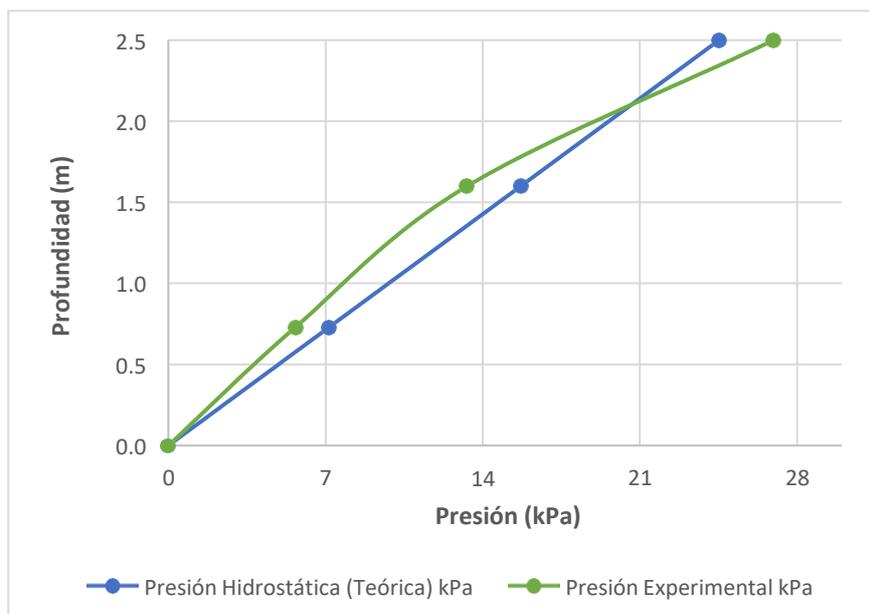


Figura 18. Gráfica de la Presión Hidrostática Teórica vs Experimental.

## Presión Lateral con Mortero

Tabla 24. Valores para el Cálculo del Coeficiente de Presión Máximo Teórico.

Densidad	1300	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad	9.81	m/s <sup>2</sup>
T	24	°C
R	1.238	m/h
Cw	0.8	
Cc	1.2	
Ccpmax	29.23	kPa

Tabla 25. Comparación de los Valores de la Presión Lateral con Mortero.

Presión Lateral en Tubo de 2 pulg (Mortero)				
Sensores	Profundidad (m)	Presión Lateral (Teórica)	Pc	Presión Experimental
Inferior	2.600	33.158	29.233	
Sensor 1 kPa (707040)	2.500	31.883	29.233	27.365
Sensor 2 kPa (707041)	1.600	20.405	20.405	19.409
Sensor 3 kPa (707042)	0.730	9.310	9.310	9.273
Superior	0.000	0.000	0.000	0.000

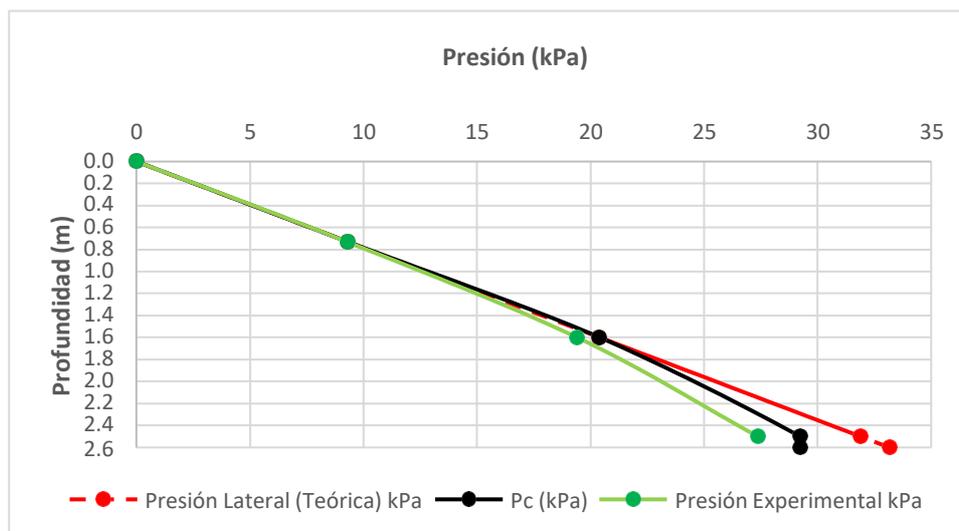


Figura 19. Gráfica de la Presión Lateral Teórica vs Experimental.

## 2.5 Procedimiento y Análisis.

En el presente ítem se establecerá la memoria técnica y un análisis de la presión en los principales modelos experimentales expuestos en la Figura 16 y 17 con el fin de determinar la máxima presión lateral ejercida por la mezcla contra las paredes del encofrado.

El experimento se dividió en dos tipos de encofrado, en la Figura 16 se observa que el material utilizado para el encofrado en general es madera. En primera instancia se fabricó 3 especímenes de columnas de dimensiones especificada en la Tabla 12, mismas que fueron colocadas y aseguradas en el laboratorio de la USFQ como se muestra en el Anexo 1. Para la colocación de la mezcla de hormigón en los 3 especímenes se realizó el cálculo de la dosificación establecida en la Tabla 15, esta dosificación representa 1 m<sup>3</sup> de la mezcla de hormigón para el llenado de cada columna se necesitó 2 dos preparaciones de esta dosificación con una vibración menor a 1.2 metros establecida en la matriz de experimentos. Una vez realizado el experimento se realizó un análisis de los valores de presión obtenidos por estos especímenes como se observa en el Anexo 2, dichos datos no son favorables para el estudio de la presión lateral ya que no existe variación de la presión en el transcurso del experimento los datos mostrados no se acercan al valor de la presión atmosférica de 1 atmosfera o 14.69 PSI deduciendo que existe errores en la programación.

La programación establecida con anterioridad no muestra lo requerido para el experimento, por lo que se opta en repetir el proceso de medición y obtener los datos de forma manual en un determinado rango de tiempo. Se lleva a cabo la colocación y asegurado de un espécimen de columna (Anexo 3) cumpliendo con las dimensiones previamente establecida modificando la colocación de los sensores como se observa en la Tabla 13, se repite el proceso de colocación de la mezcla de hormigón cumpliendo

con la dosificación establecida. En el proceso de colocación de la mezcla se observa que no existe variación en la presión llegando a una altura determinada y cancelando la medición, al desencofrar la columna se percata que existe obstrucción en los sensores por el agregado como se refleja en el Anexo 4.

Con la modificación en el encofrado (Figura 17) se realiza la medición de la presión hidrostática, al iniciar la medición se observa variación de la presión (Tabla 20), obteniendo valores que se asemejan a los cálculos teóricos determinados en la Tabla 23, con los datos obtenidos se grafica la presión hidrostática teórica vs la presión hidrostática experimental dichas líneas de presión se detallan en la Figura 18 teniendo una variación en la línea de la presión hidrostática experimental esto se debe a la calibración de los sensores. Con la certeza de que los valores de presión hidrostática son adecuados se procede a recrear la medición de la presión lateral con la mezcla de mortero (Tabla 16) al verter la mezcla en la tubería polietileno se logra medir la presión que ejerce la mezcla sobre los sensores valores que se reflejan en la Tabla 21, para poder determinar las variaciones de la presión se procede a calcular  $C_{CPmax}$  con el método del ACI-SP4 el valor del coeficiente de presión máxima se da a conocer en la Tabla 24, logrando obtener los valores reflejados en la Tabla 25 al obtener un  $C_{CPmax} = 29.233$  este dato es remplazado en los valores de presión teórico mayores a dicho valor estableciendo la máxima presión lateral o presión de poros como se observa en la Figura 6 y 7.

Con los cambios realizados en los valores se grafica las líneas de presión (Figura 19), en la gráfica de la Figura 19 la línea  $P_c$  se detalla el punto de quiebre donde la presión se estabiliza siendo este el  $P_{max}$ . En dicha gráfica también, se observa la línea de presión lateral experimental y el punto de quiebre  $P_{max}$ , se observa los datos de la presión lateral con mortero existe inconsistencia con los valores teóricos por lo que se establece

realizar la calibración de los sensores al determinar la presión hidrostática es fundamental realizar este proceso, el mismo ayudara a reducir variaciones en los datos obtenidos. Logrando analizar la presión lateral del mortero que al no ser una mezcla de hormigón adecuada que cumpla con la densidad del hormigón teórico de  $2100 \text{ kg/m}^3$  no se llega a determinar las variaciones que pueden existir con la implementación de cementos puzolánicos.

### **3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **3.1 Conclusiones.**

El presente proyecto integrador culmino y cumplió con los objetivos especificados, en el cual se elaboró y analizó especímenes donde se calculó la presión lateral que ejerce la mezcla sobre las paredes del encofrado.

Se logro realizar las mediciones en una variación de encofrado con el fin de obtener valores reales con los que se pueda realizar comparaciones de los valores teóricos y experimentales.

Al hablar del comportamiento del hormigón al ser un material heterogéneo esta cumple con el principio de la ley hidrostática con la única variación que al llegar a un punto el hormigón establece la máxima presión y se estabiliza. Esta variación es observada y analizada en este proyecto integrador de forma satisfactoria.

Se concluye que al determinar la presión lateral el experimento tiene mayor eficacia en lugares controlados considerando los factores que influyen sobre el experimento con el fin de reducir los errores de medición.

### 3.2 Recomendaciones

Se recomienda para las futuras mediciones, modificaciones en la programación del Software NI Signal Express o a su vez crear un software que sea más amigable y que determine datos en rangos de tiempo predeterminados por el usuario. Por otro lado, se puede realizar cursos los mismos que son establecidos en la página de la empresa NI Signal Express y así obtener una mayor capacitación sobre la utilización del software.

Al realizar las mediciones en encofrados de madera se recomienda que el área de medición del sensor incremente. Como se observó en el experimento existe la obstrucción de los sensores con el agregado grueso haciendo que las presiones registradas se distorsionen.

Se recomienda realizar medición de la presión hidrostática en la variación de encofrado establecido en la Figura 17 este proceso ayudara en la calibración de los sensores y a reducir los errores con los datos obtenidos.

Al ser un proyecto de investigación se recomienda que el mismo sea realizado en parejas con el fin de minimizar errores y costos de fabricación en laboratorio.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almaraz, A. S. (2010). *Empuje lateral del hormigón fresco sobre elementos de encofrado vertical: estudio experimental y desarrollo de un modelo empírico*. Navarra : Universidad de Navarra .
- Amador, A. J. (25 de 02 de 2016). *Tipos de Cementos*. Obtenido de [http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/6.tipos\\_de\\_cemento.pdf](http://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/6.tipos_de_cemento.pdf)
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Washinton.
- ASTM. (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. United States.
- ASTM. (2018). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Washington, DC.
- ASTM. (2021). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Washington.
- Barriga, P. P. (2007). *Tecnología del Concreto de Alto Desempeño*. Paris: Imprimerie Lafayette. Obtenido de <https://issuu.com/jazminalva/docs/42540958-tecnologia-del-concreto-de>
- BECOSAN. (28 de 06 de 2021). Obtenido de <https://www.becosan.com/es/hormigon-fresco/>
- Beltran, S. (18 de 12 de 2020). Análisis de los métodos de cálculo de la presión del hormigón fresco sobre los encofrados. Quito, Pichincha , Ecuador : USFQ.
- Benites, M. (2011). *CONCRETO CON CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO TIPO IP ATALAS DE RESISTENCIA TEMPRANAS CON LA TECNOLOGIA SIKAVISCOCRETE 20HE*. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37851209/benites\\_cm-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1653539605&Signature=ciBkRpdUmbjsuD6pr7Xq0OZ4Htex6oJ7zFaZz~F4dAA6C2tpPpFVY02eDklaCRsEYAHZ7rGgwBMluMyxIdx2Jm4pOXDnGgg2eLdnyTCrkDwc6jImcNf9fMMZHo-9lyCf5kpQIeJ-9LPxXGmEs](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37851209/benites_cm-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1653539605&Signature=ciBkRpdUmbjsuD6pr7Xq0OZ4Htex6oJ7zFaZz~F4dAA6C2tpPpFVY02eDklaCRsEYAHZ7rGgwBMluMyxIdx2Jm4pOXDnGgg2eLdnyTCrkDwc6jImcNf9fMMZHo-9lyCf5kpQIeJ-9LPxXGmEs)
- Borfitz, A. (2008). *UNNE*. Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/pub/Geotecnia/2k8-04-10/Filpresiones.pdf>
- Borges, P. C. (25 de 11 de 2015). *SciELO*. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-68352016000100064#:~:text=El%20cemento%20tipo%20IS%20est%C3%A1,posteriormente%20a%20la%20mezcla%20cementante.](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100064#:~:text=El%20cemento%20tipo%20IS%20est%C3%A1,posteriormente%20a%20la%20mezcla%20cementante.)
- Brito, P. (2017). *Empuje lateral del hormigón fresco en encofrados*. Quito: PUCE.
- Callejas, J. (1977). Cementos puziólánicos. En *Materiales de Construcción* (págs. 23-36).
- Giancoli, D. (2006). *Física : principios con aplicaciones, volumen 1*. Mexico: Pearson Educación.
- Harrison, T. (1983). *Pressure on vertical Formwork when Concrete is Places in Wide Sections*. Cement and Concrete Association.
- Hurd, M. (2005). *Formwork for Concrete (7th ed.)*. American Concrete Institute.
- INEN. (25 de 05 de 1977). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE ENCOFRADOS*. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/GPE-16.pdf>
- INEN. (2002). *HORMIGONES. HORMIGÓN PREPARADO EN OBRA*. Quito.
- INEN. (2011). *CEMENTOS HIDRAULICOS COMPUESTOS, REQUISITOS*. Quito.
- Institute, A. C. (2014). *Guide to Formwork for*. Texas.
- Johnston, D. W. (2014). *Formwork for Concrete*. Michigan: American Concrete Institute .

- Masgo, A. (23 de 02 de 2019). *SlidePlayer*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/14156781/>
- Monteiro, K. M. (23 de 11 de 1998). *Concreto Estructura, propiedades y materiales*. Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Obtenido de <https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento>
- NEC. (2015). *Estructuras de Hormigon Armado*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Negra, L. (2005). *CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO CPP 40(ARS, RRAA)*. Obtenido de <https://www.lomanegra.com/wp-content/uploads/2017/09/Folleto-CPP40-LomaNegra.pdf>
- Piqueras, V. Y. (17 de 04 de 2017). *Métodos de cálculo del empuje del hormigón fresco*. Obtenido de Library: <https://core.ac.uk/display/275623142?source=2>
- Piqueras, V. Y. (01 de 03 de 2017). *Qué son y para qué sirven los encofrados*. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2017/03/01/que-son-y-para-que-sirven-los-encofrados/>
- Possehl. (17 de 12 de 2020). *Los cementos aluminosos*. Obtenido de <https://www.possehl.mx/los-cementos-aluminosos/>
- Rangel, M. (2019). *Anefhop*. Andalucía: Asociacion de Laboratorios de Construcción Andalucía. Obtenido de [https://www.anefhop.com/wp-content/uploads/2020/01/20200110\\_Manual\\_de\\_control\\_de\\_ensayos\\_de\\_hormigon.pdf](https://www.anefhop.com/wp-content/uploads/2020/01/20200110_Manual_de_control_de_ensayos_de_hormigon.pdf)
- Rodriguez, V. (2021). *Presión Lateral del hormigón fresco: Instrumentación y diseño de encofrados de muro*. Quito : USFQ.
- Sandoval, J. A. (2021). *Presión lateral del hormigón fresco: calibración de instrumentos y obtención de datos*. Quito: USFQ .
- Soto, P. (05 de 01 de 2019). *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/3584>
- Tapia, G. (2019). *Lateral pressure of fresh cement concrete on formwork using composite cement Type IP*. Quito: USFQ.
- UMACON . (28 de 03 de 2021). Obtenido de <http://www.umacon.com/noticia.php/es/que-es-el-cemento-portland-tipos-y-caracteristicas/413>
- Yu, D. N. (2000). *Modeling and Predicting Concrete Lateral Pressure on Formwork*. North Carolina : Institute of Construction, Dept. of Civil Engineering.

## 5. ANEXOS

### Anexo 1



*Figura 20. Colocación de Columnas en Laboratorio de la USFQ.*

### Anexo 2

*Tabla 26. Valores de la Presión Lateral en las 3 Columnas.*

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4	
Numeración	Corriente (mA)						
0.000	2.878	0.000	1.373	0.000	-0.130	0.000	2.048
0.001	2.877	0.001	1.373	0.001	-0.129	0.001	2.048
0.002	2.877	0.002	1.373	0.002	-0.129	0.002	2.049
0.003	2.877	0.003	1.373	0.003	-0.129	0.003	2.049
0.004	2.877	0.004	1.373	0.004	-0.129	0.004	2.049
0.005	2.876	0.005	1.372	0.005	-0.129	0.005	2.050
0.006	2.876	0.006	1.372	0.006	-0.129	0.006	2.050
0.007	2.876	0.007	1.372	0.007	-0.129	0.007	2.050
0.008	2.876	0.008	1.372	0.008	-0.128	0.008	2.050
0.009	2.875	0.009	1.372	0.009	-0.128	0.009	2.051
0.010	2.875	0.010	1.372	0.010	-0.128	0.010	2.051
0.011	2.875	0.011	1.372	0.011	-0.128	0.011	2.051
0.012	2.874	0.012	1.372	0.012	-0.128	0.012	2.052
0.013	2.874	0.013	1.371	0.013	-0.128	0.013	2.052
0.014	2.874	0.014	1.371	0.014	-0.128	0.014	2.052
0.015	2.874	0.015	1.371	0.015	-0.127	0.015	2.052
0.016	2.873	0.016	1.371	0.016	-0.127	0.016	2.053
0.017	2.873	0.017	1.371	0.017	-0.127	0.017	2.053
0.018	2.873	0.018	1.371	0.018	-0.127	0.018	2.053

0.019	2.872	0.019	1.371	0.019	-0.127	0.019	2.054
0.020	2.872	0.020	1.371	0.020	-0.127	0.020	2.054
0.021	2.872	0.021	1.370	0.021	-0.127	0.021	2.054
0.022	2.871	0.022	1.370	0.022	-0.127	0.022	2.054
0.023	2.871	0.023	1.370	0.023	-0.127	0.023	2.055
0.024	2.871	0.024	1.370	0.024	-0.127	0.024	2.055
0.025	2.871	0.025	1.370	0.025	-0.126	0.025	2.055
0.026	2.870	0.026	1.370	0.026	-0.126	0.026	2.056
0.027	2.870	0.027	1.370	0.027	-0.126	0.027	2.056
0.028	2.870	0.028	1.370	0.028	-0.126	0.028	2.056
0.029	2.869	0.029	1.369	0.029	-0.126	0.029	2.056
0.030	2.869	0.030	1.369	0.030	-0.126	0.030	2.057
0.031	2.869	0.031	1.369	0.031	-0.126	0.031	2.057
0.032	2.868	0.032	1.369	0.032	-0.126	0.032	2.057
0.033	2.868	0.033	1.369	0.033	-0.126	0.033	2.058
0.034	2.868	0.034	1.369	0.034	-0.126	0.034	2.058
0.035	2.867	0.035	1.369	0.035	-0.126	0.035	2.058
0.036	2.867	0.036	1.369	0.036	-0.126	0.036	2.058
0.037	2.867	0.037	1.369	0.037	-0.126	0.037	2.059
0.038	2.866	0.038	1.368	0.038	-0.126	0.038	2.059
0.039	2.866	0.039	1.368	0.039	-0.126	0.039	2.059
0.040	2.866	0.040	1.368	0.040	-0.126	0.040	2.059
0.041	2.865	0.041	1.368	0.041	-0.126	0.041	2.060
0.042	2.865	0.042	1.368	0.042	-0.126	0.042	2.060
0.043	2.865	0.043	1.368	0.043	-0.126	0.043	2.060
0.044	2.864	0.044	1.368	0.044	-0.126	0.044	2.060
0.045	2.864	0.045	1.368	0.045	-0.126	0.045	2.061
0.046	2.864	0.046	1.368	0.046	-0.126	0.046	2.061
0.047	2.863	0.047	1.368	0.047	-0.126	0.047	2.061
0.048	2.863	0.048	1.368	0.048	-0.126	0.048	2.061
0.049	2.863	0.049	1.367	0.049	-0.126	0.049	2.062
0.050	2.862	0.050	1.367	0.050	-0.126	0.050	2.062
0.051	2.862	0.051	1.367	0.051	-0.126	0.051	2.062
0.052	2.862	0.052	1.367	0.052	-0.126	0.052	2.062
0.053	2.861	0.053	1.367	0.053	-0.126	0.053	2.062
0.054	2.861	0.054	1.367	0.054	-0.126	0.054	2.063
0.055	2.861	0.055	1.367	0.055	-0.126	0.055	2.063
0.056	2.860	0.056	1.367	0.056	-0.126	0.056	2.063
0.057	2.860	0.057	1.367	0.057	-0.126	0.057	2.063
0.058	2.860	0.058	1.367	0.058	-0.126	0.058	2.063
0.059	2.859	0.059	1.367	0.059	-0.126	0.059	2.064
0.060	2.859	0.060	1.367	0.060	-0.126	0.060	2.064
0.061	2.859	0.061	1.367	0.061	-0.126	0.061	2.064
0.062	2.858	0.062	1.367	0.062	-0.126	0.062	2.064
0.063	2.858	0.063	1.367	0.063	-0.126	0.063	2.064
0.064	2.858	0.064	1.367	0.064	-0.126	0.064	2.064
0.065	2.857	0.065	1.367	0.065	-0.126	0.065	2.064
0.066	2.857	0.066	1.367	0.066	-0.126	0.066	2.065
0.067	2.857	0.067	1.367	0.067	-0.127	0.067	2.065

0.068	2.856	0.068	1.367	0.068	-0.127	0.068	2.065
0.069	2.856	0.069	1.367	0.069	-0.127	0.069	2.065
0.070	2.856	0.070	1.367	0.070	-0.127	0.070	2.065
0.071	2.856	0.071	1.366	0.071	-0.127	0.071	2.065
0.072	2.855	0.072	1.366	0.072	-0.127	0.072	2.065
0.073	2.855	0.073	1.366	0.073	-0.127	0.073	2.065
0.074	2.855	0.074	1.366	0.074	-0.127	0.074	2.066
0.075	2.854	0.075	1.367	0.075	-0.127	0.075	2.066
0.076	2.854	0.076	1.367	0.076	-0.127	0.076	2.066
0.077	2.854	0.077	1.367	0.077	-0.127	0.077	2.066
0.078	2.854	0.078	1.367	0.078	-0.128	0.078	2.066
0.079	2.853	0.079	1.367	0.079	-0.128	0.079	2.066
0.080	2.853	0.080	1.367	0.080	-0.128	0.080	2.066
0.081	2.853	0.081	1.367	0.081	-0.128	0.081	2.066
0.082	2.852	0.082	1.367	0.082	-0.128	0.082	2.066
0.083	2.852	0.083	1.367	0.083	-0.128	0.083	2.066
0.084	2.852	0.084	1.367	0.084	-0.128	0.084	2.066
0.085	2.852	0.085	1.367	0.085	-0.129	0.085	2.066
0.086	2.851	0.086	1.367	0.086	-0.129	0.086	2.066
0.087	2.851	0.087	1.367	0.087	-0.129	0.087	2.066
0.088	2.851	0.088	1.367	0.088	-0.129	0.088	2.066
0.089	2.851	0.089	1.367	0.089	-0.129	0.089	2.066
0.090	2.851	0.090	1.367	0.090	-0.129	0.090	2.066
0.091	2.850	0.091	1.367	0.091	-0.129	0.091	2.066
0.092	2.850	0.092	1.367	0.092	-0.130	0.092	2.066
0.093	2.850	0.093	1.367	0.093	-0.130	0.093	2.066
0.094	2.850	0.094	1.367	0.094	-0.130	0.094	2.066
0.095	2.850	0.095	1.368	0.095	-0.130	0.095	2.066
0.096	2.849	0.096	1.368	0.096	-0.130	0.096	2.066

**Anexo 3**

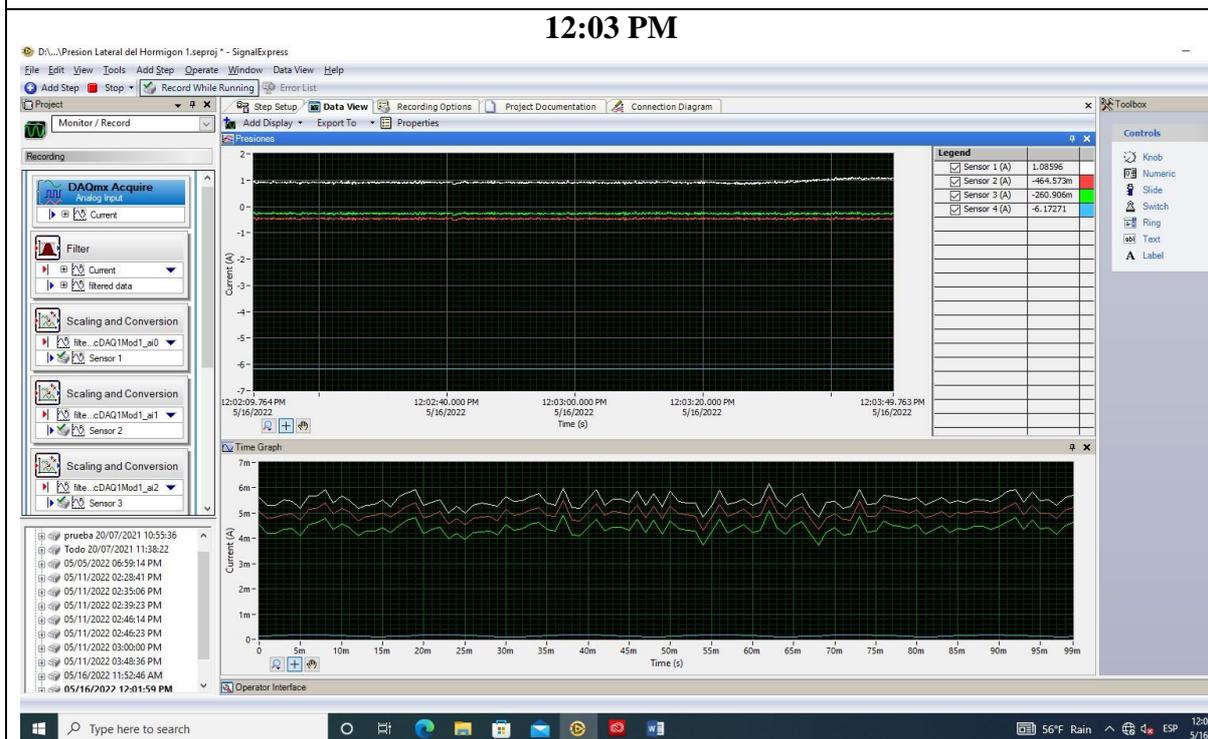
*Figura 21. Colocación de Columna en Laboratorio de la USFQ.*

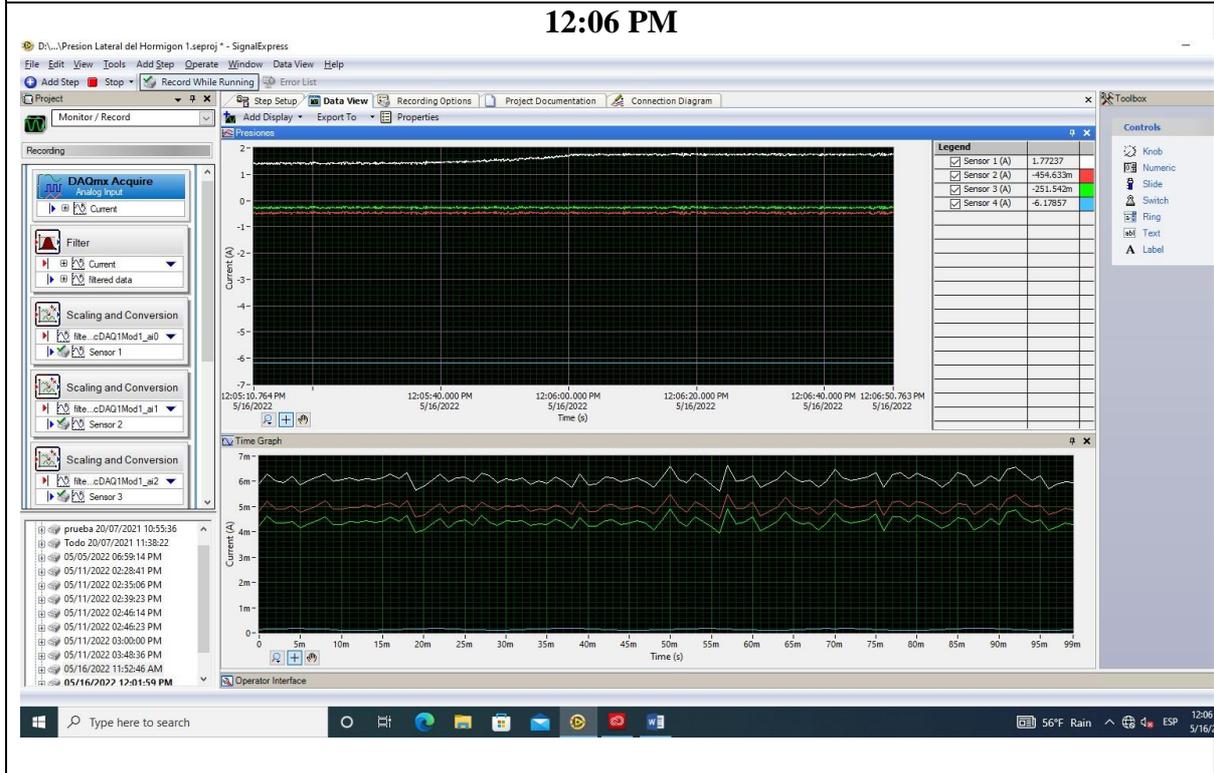
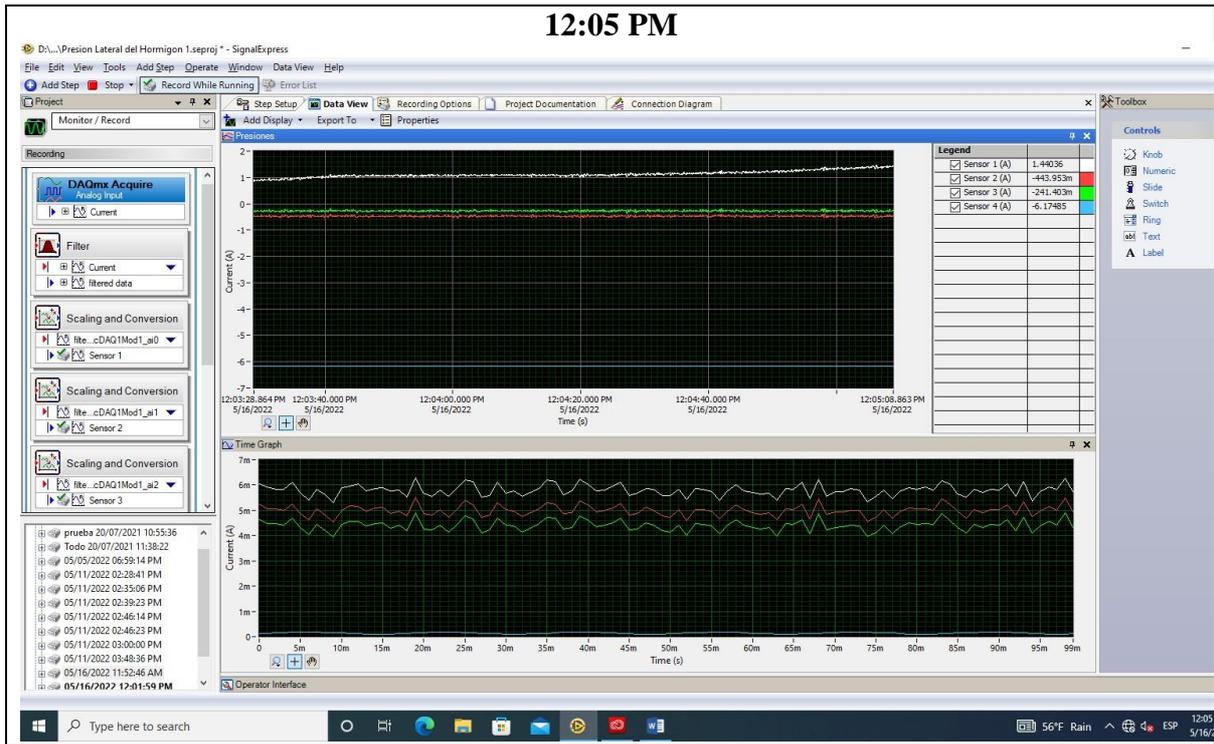
**Anexo 4**

*Figura 22. Obstrucción del Agregado Grueso en los Sensores.*

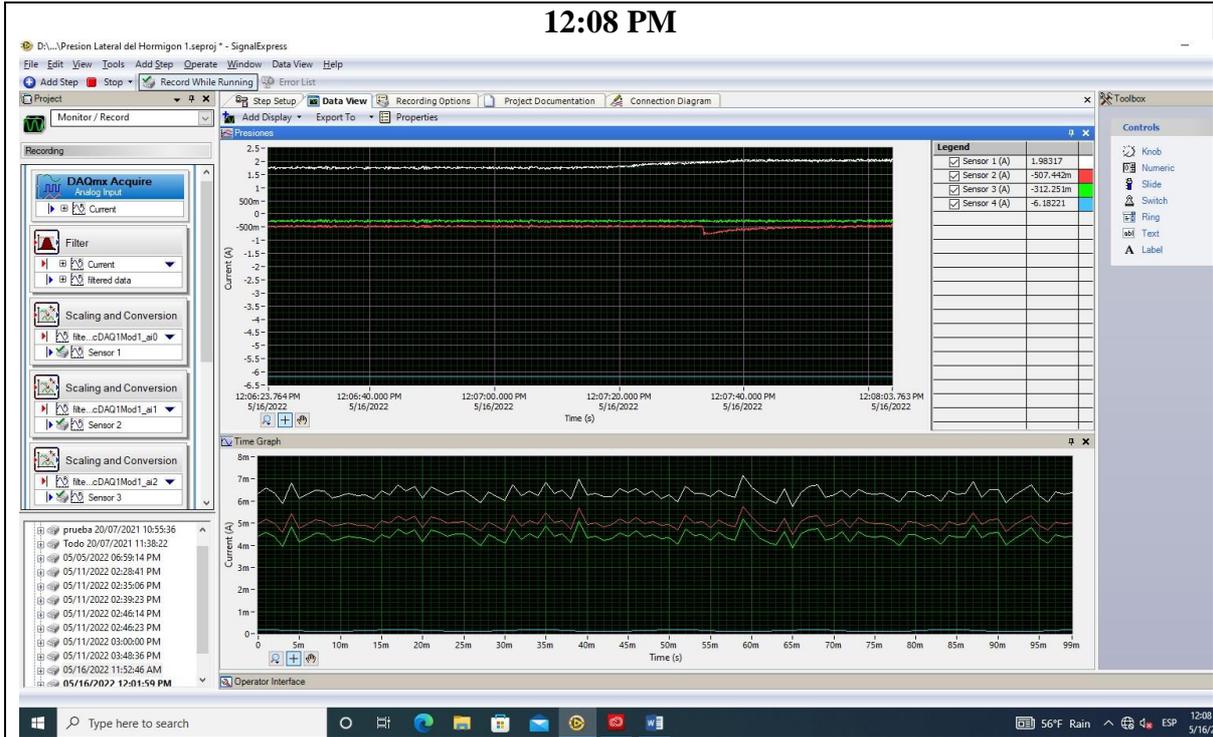
Anexo 5

Datos de la Presión Hidrostática Obtenidos con Agua.

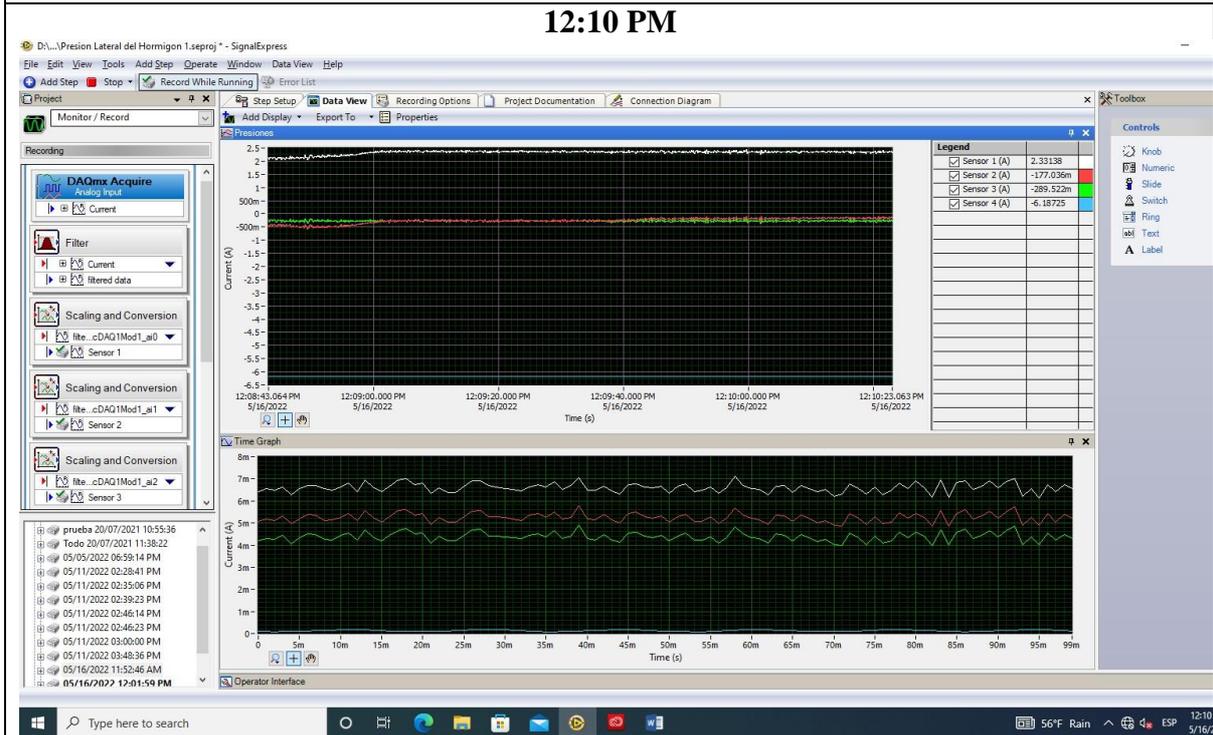




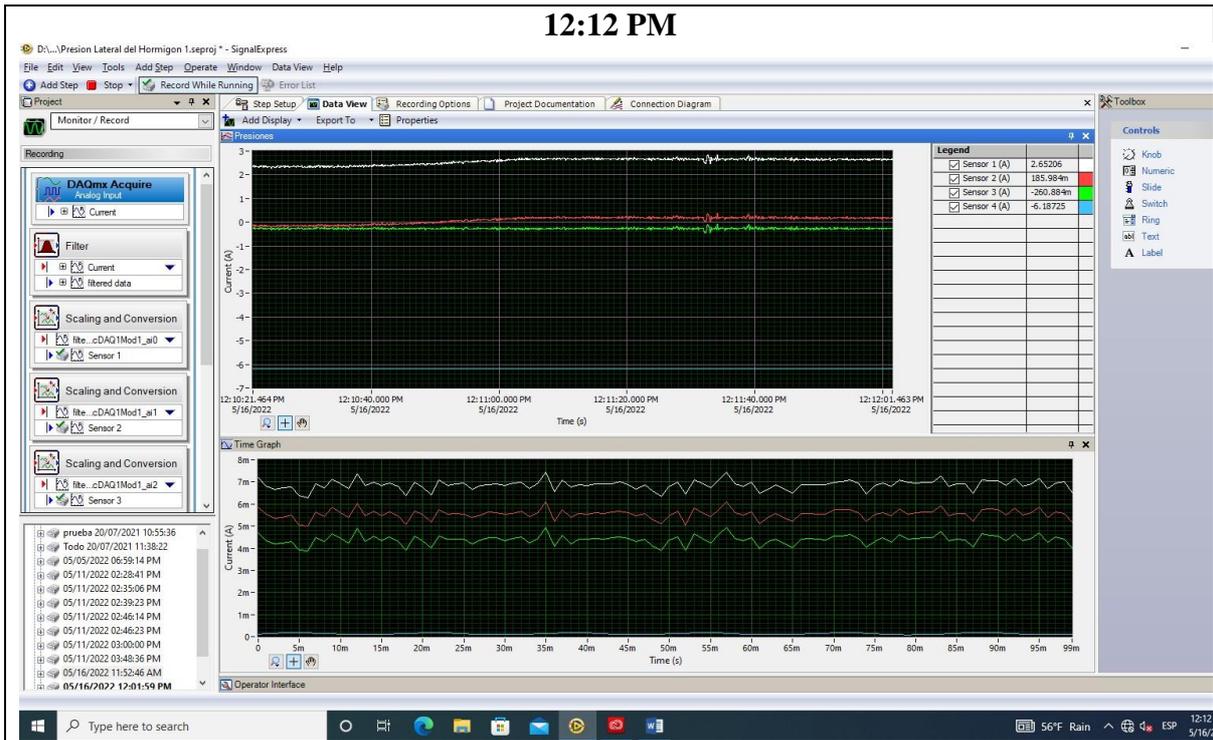
12:08 PM



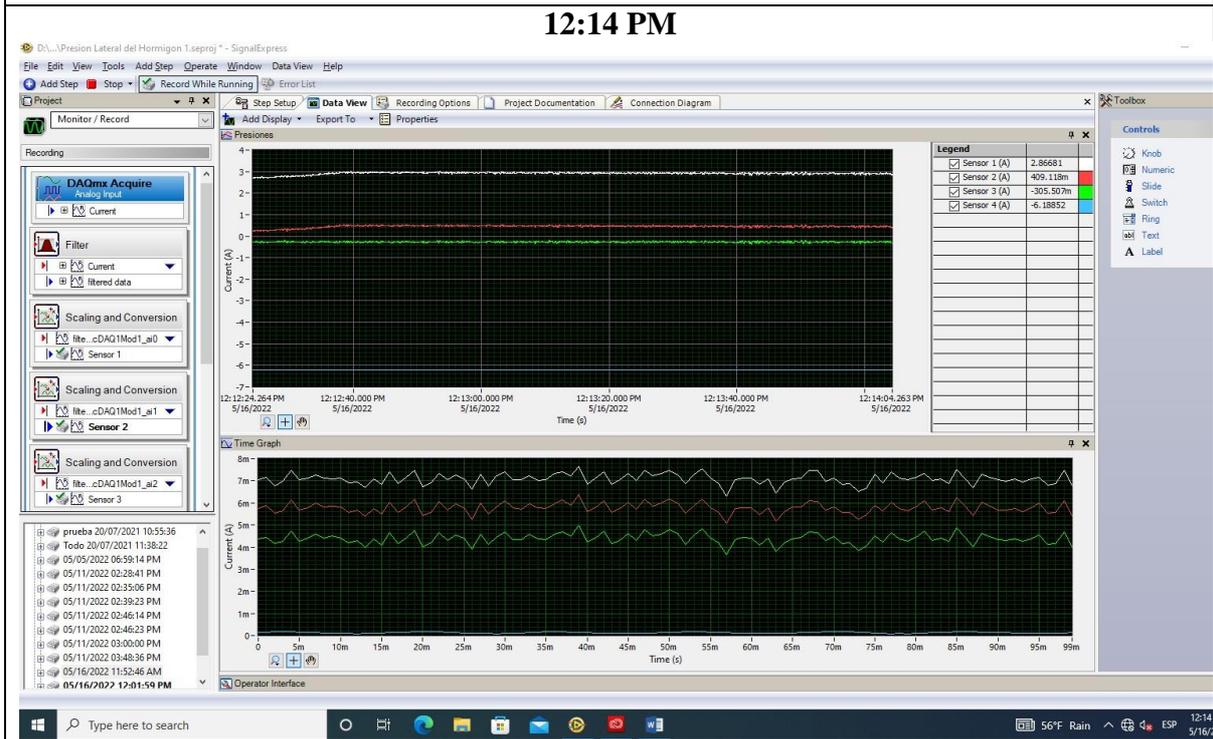
12:10 PM



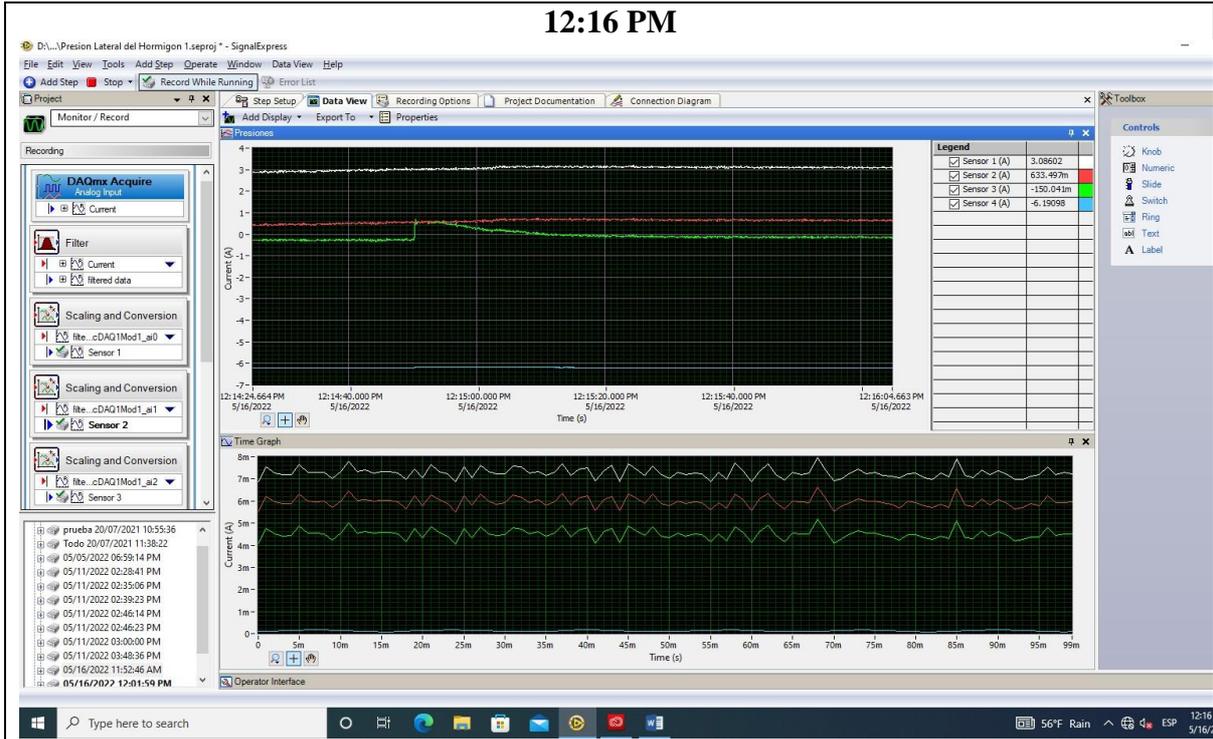
12:12 PM



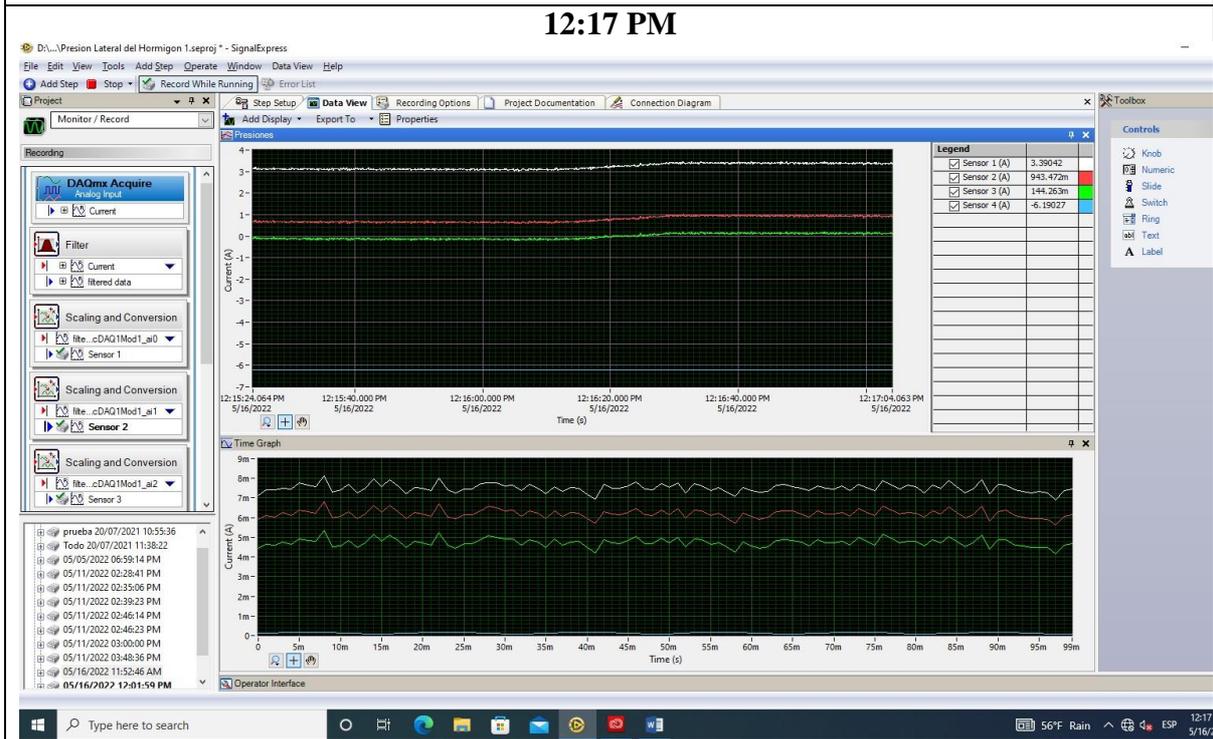
12:14 PM



12:16 PM



12:17 PM



### Fin del Experimento con Agua 12:18 PM

Dr:\\_Presion Lateral del Hormigon 1.seproj - SignalExpress

File Edit View Tools Add Step Operate Window Data View Help

Add Step Stop Record While Running Error List

Project Step Setup Data View Recording Options Project Documentation Connection Diagram

Step Setup Add Display Export To Properties

Monitor / Record

Recording

DAQmx Acquire Analog Input

- Current

Filter

- Current
- Filtered data

Scaling and Conversion

- Unit: mV
- Module: cDAQ1Mod1\_ai0
- Sensor 1

Scaling and Conversion

- Unit: mV
- Module: cDAQ1Mod1\_ai1
- Sensor 2

Scaling and Conversion

- Unit: mV
- Module: cDAQ1Mod1\_ai2
- Sensor 3

prueba 20/07/2021 10:55:36

Todo 20/07/2021 11:38:22

05/05/2022 06:59:14 PM

05/11/2022 02:28:41 PM

05/11/2022 02:35:06 PM

05/11/2022 02:39:23 PM

05/11/2022 02:46:14 PM

05/11/2022 02:46:23 PM

05/11/2022 03:00:00 PM

05/11/2022 03:48:36 PM

05/16/2022 11:52:46 AM

05/16/2022 12:01:59 PM

Operator Interface

Time Series

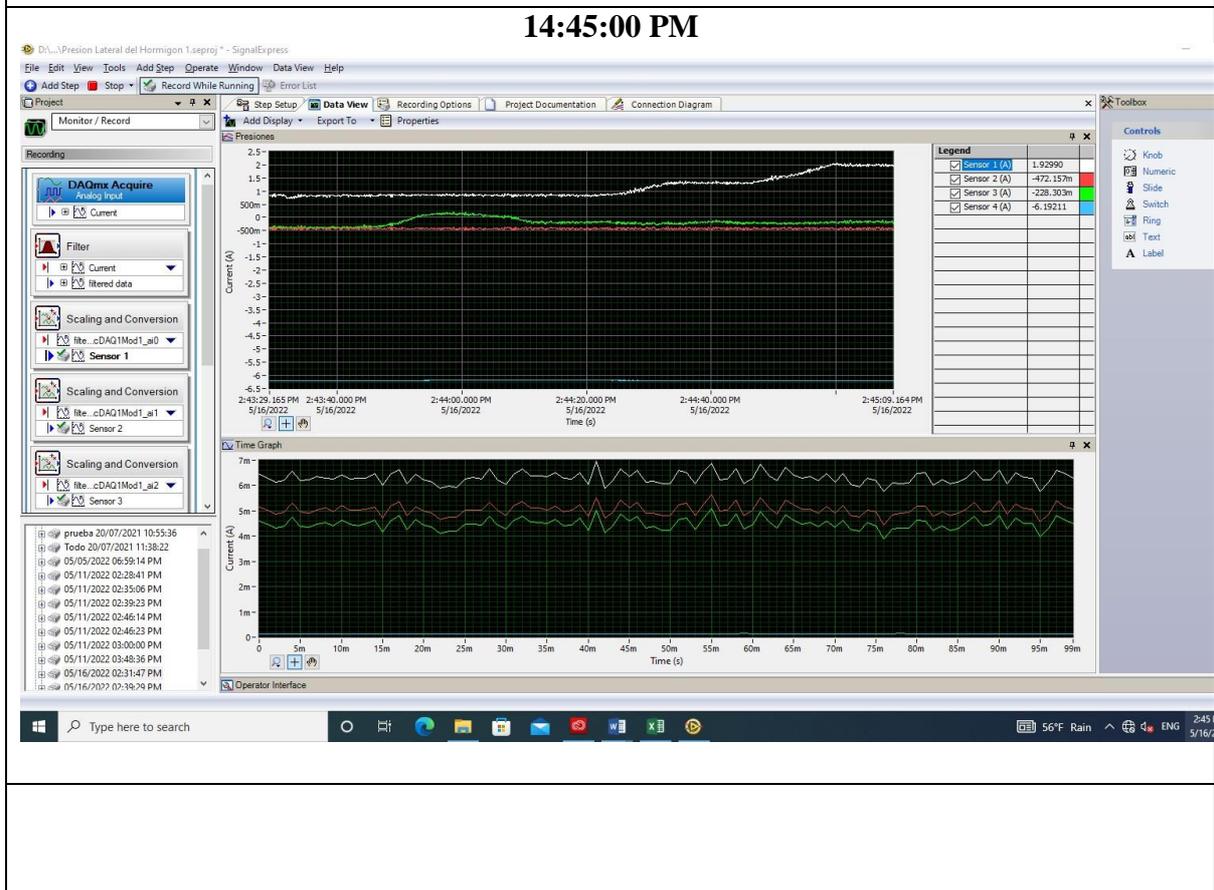
Sensor	Value
Sensor 1 (A)	3.61548
Sensor 2 (A)	1.16642
Sensor 3 (A)	386.843m
Sensor 4 (A)	-6.19094

Time Graph

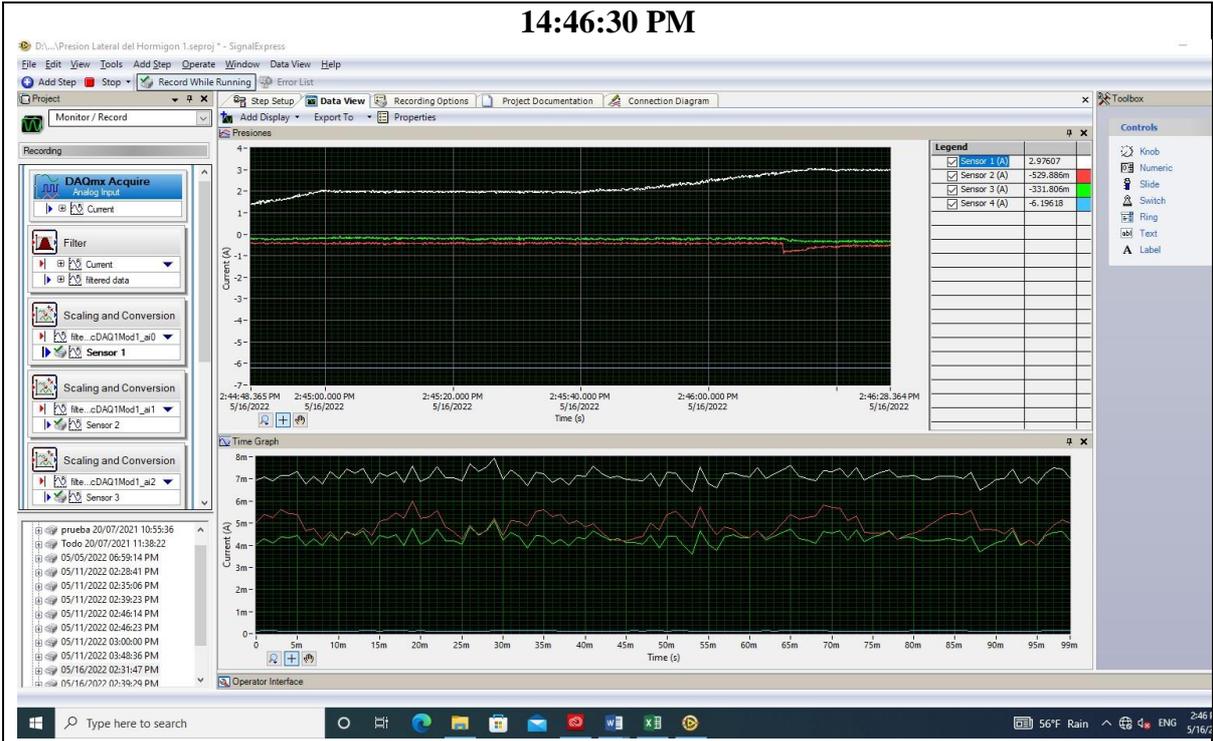
56°F Rain ESP 12:18 5/16/22

Anexo 6

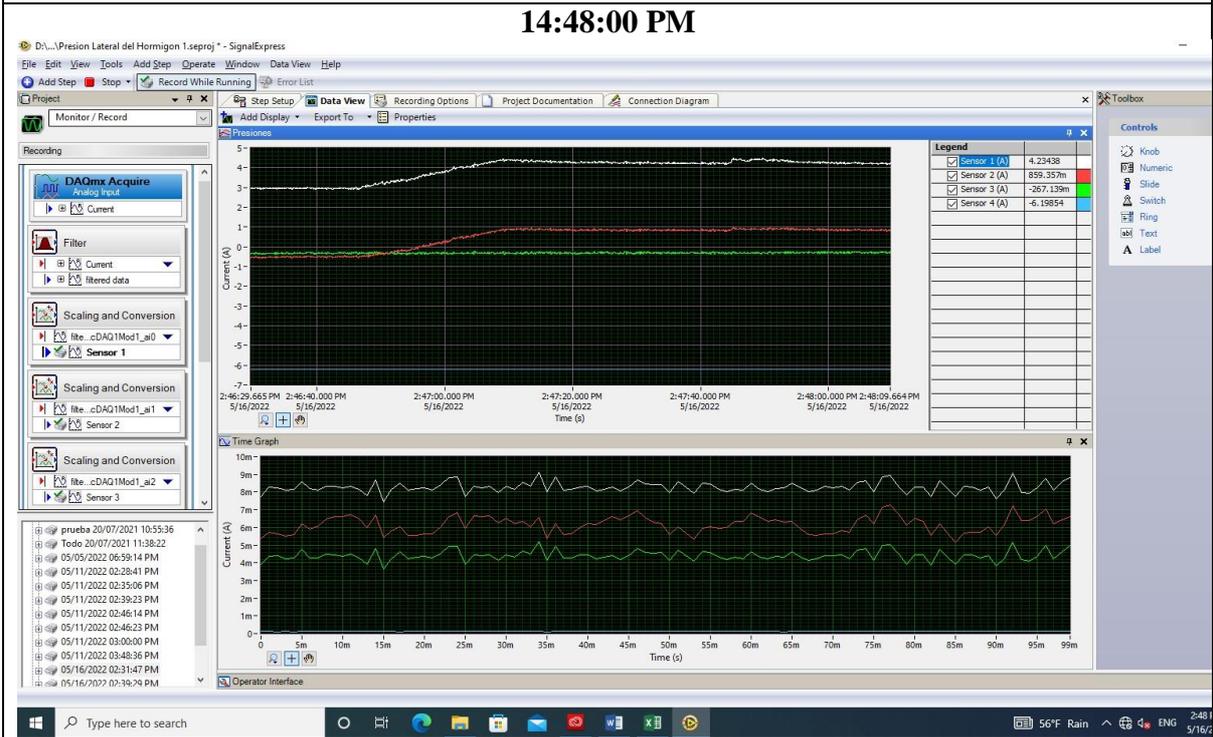
Datos de la Presión Lateral Obtenidos con Mortero.

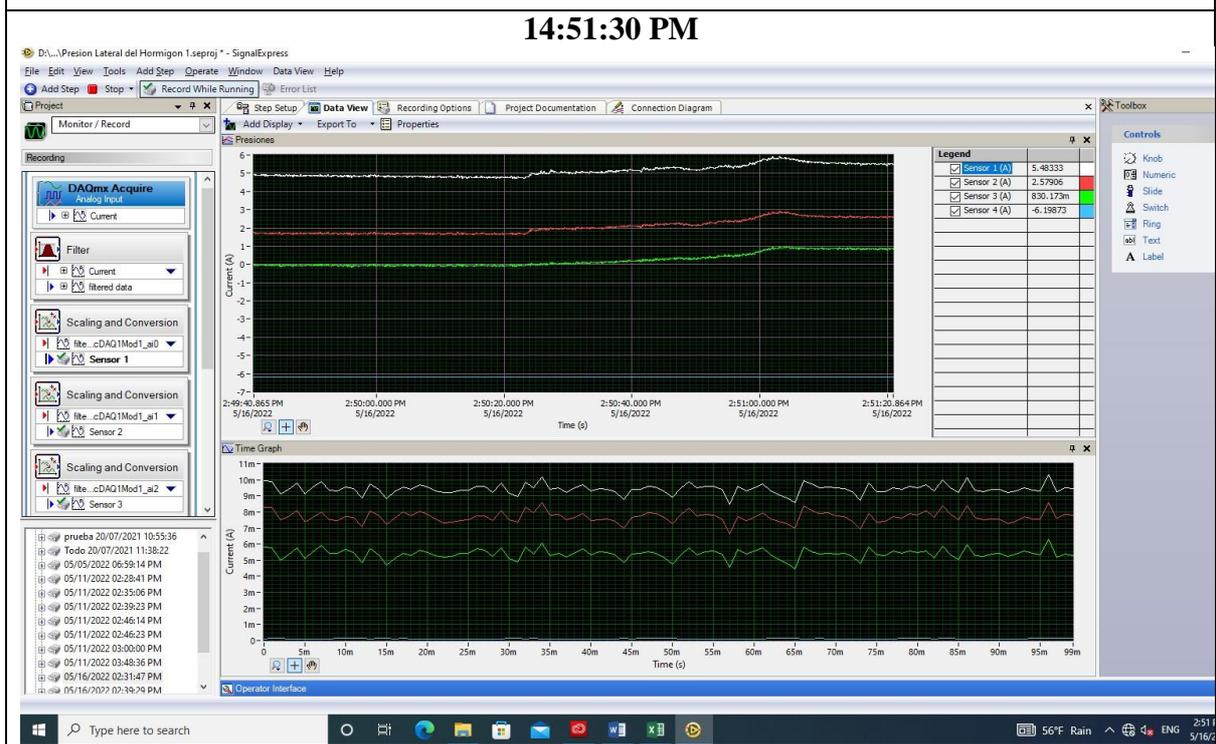
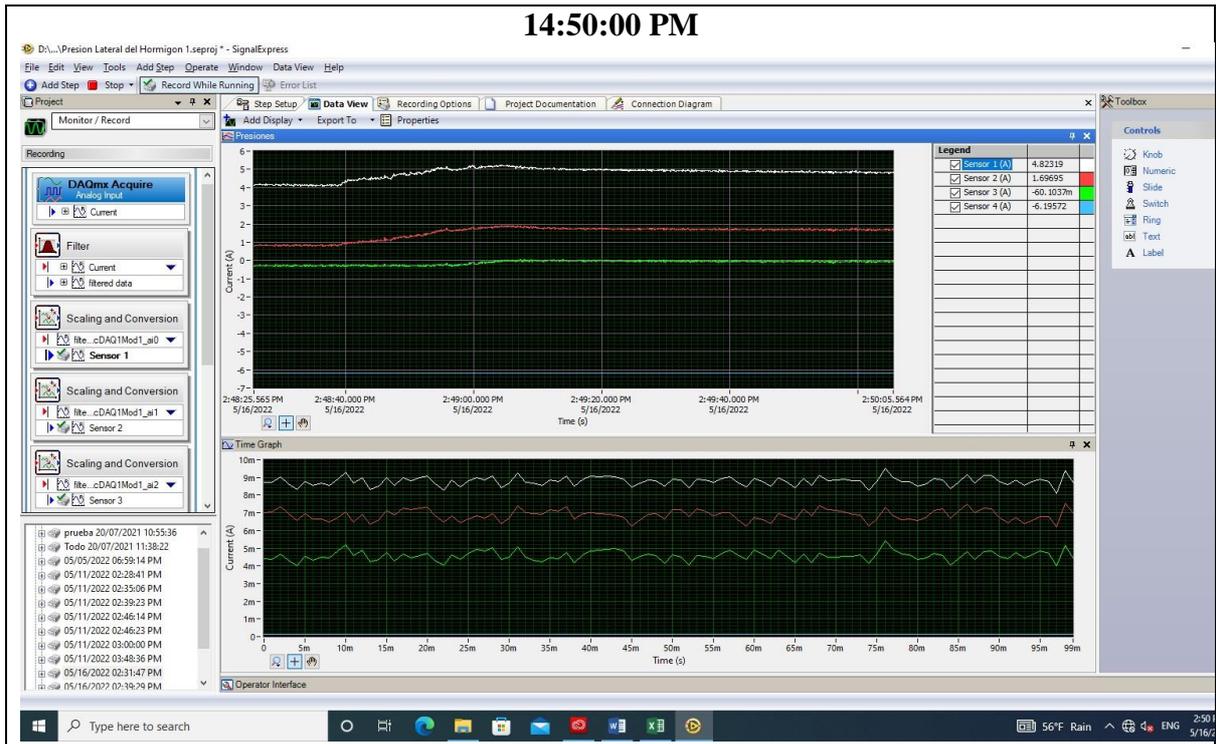


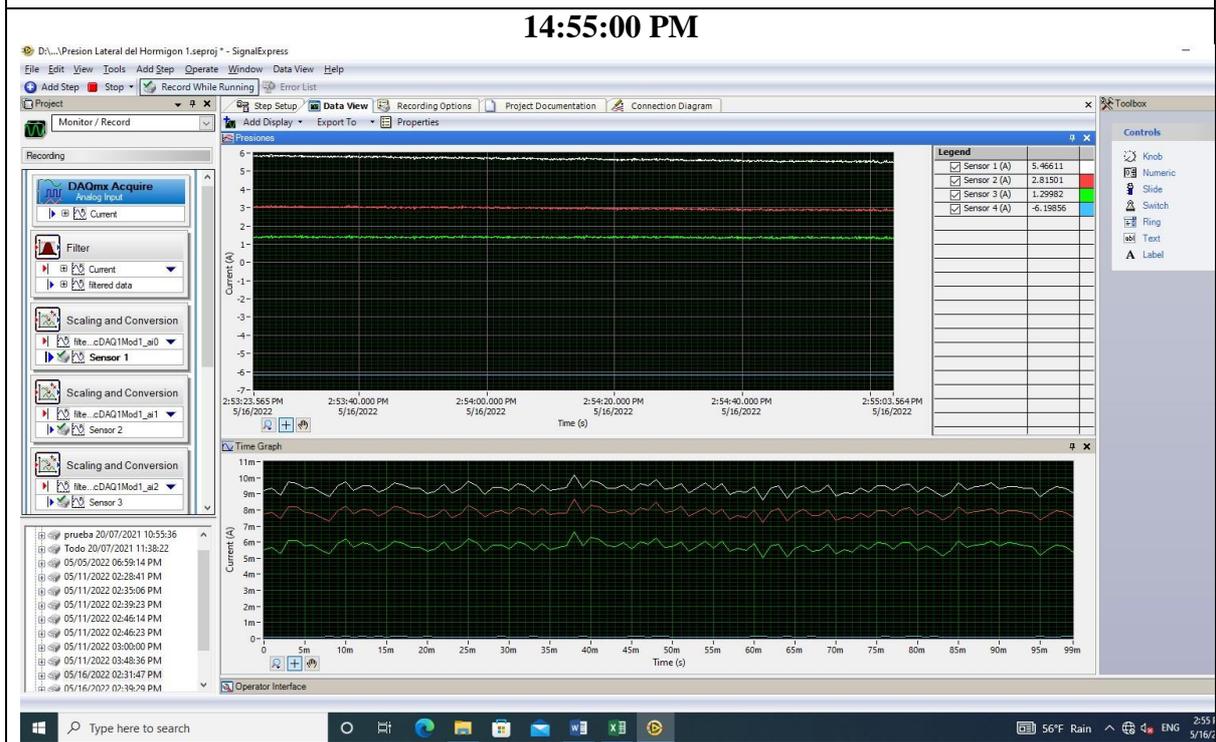
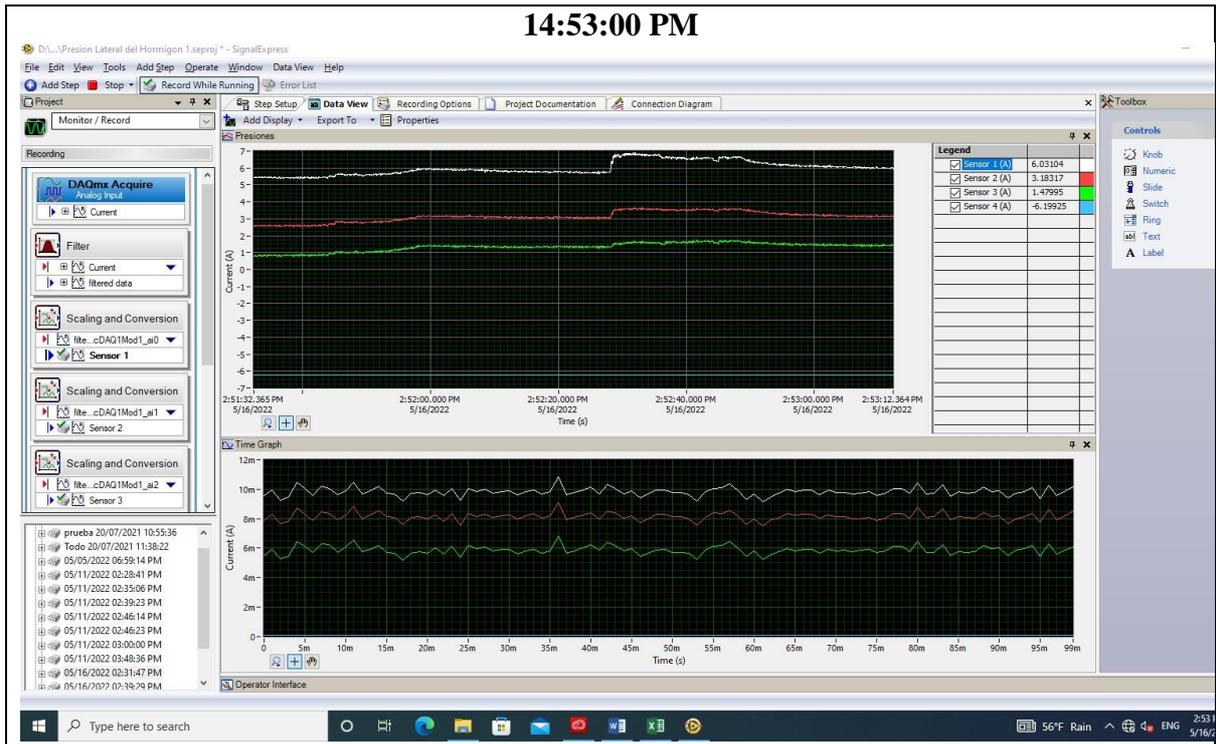
14:46:30 PM

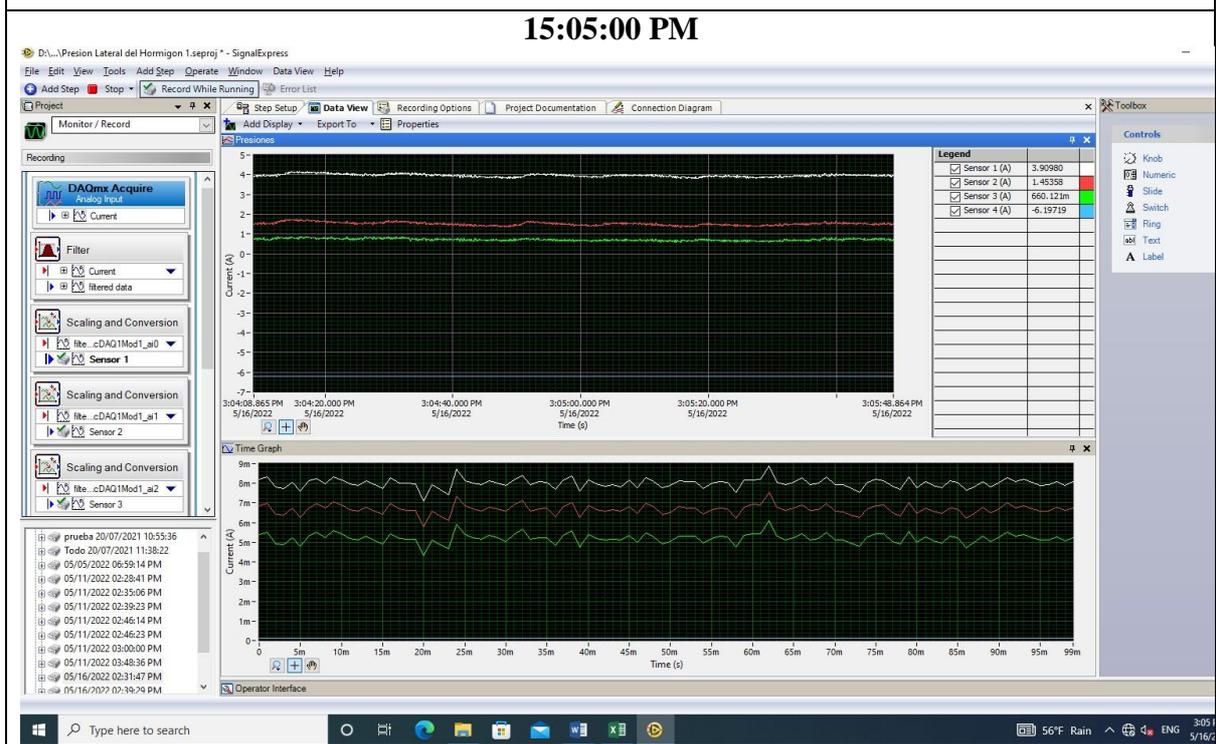
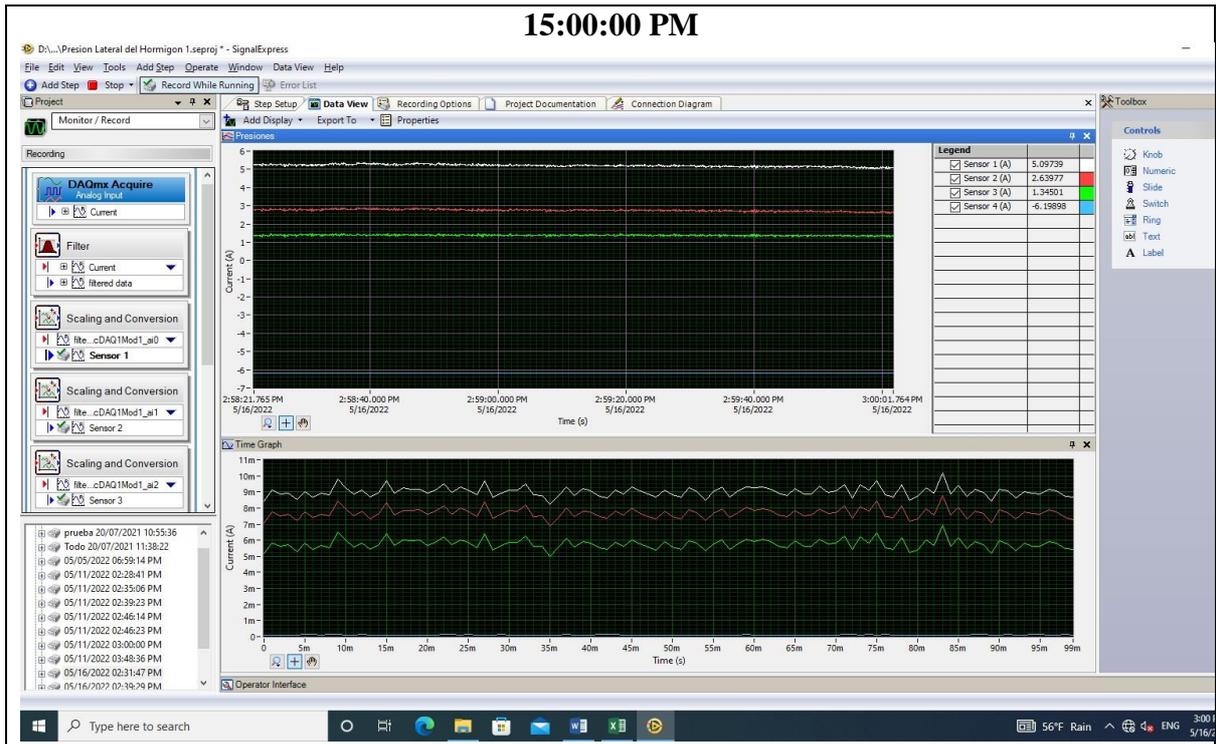


14:48:00 PM









# Fin del Experimento con Mortero 15:08:00 PM

SignalExpress interface showing experimental data for mortar. The main window displays a graph of Current (A) vs Time (s) from 3:06:21.565 PM to 3:08:01.564 PM on 5/16/2022. The graph shows four data series: Sensor 1 (A) (black), Sensor 2 (A) (red), Sensor 3 (A) (green), and Sensor 4 (A) (blue). A legend on the right lists the sensor values: Sensor 1 (A) 3.96561, Sensor 2 (A) 1.48920, Sensor 3 (A) 653.230m, and Sensor 4 (A) -6.19704. Below the main graph is a 'Time Graph' showing a zoomed-in view of the data from 0 to 99m on the x-axis and 0 to 9m on the y-axis. The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Tools, Add Step, Operate, Window, Data View, Help), a toolbar, and a recording panel on the left with options for DAQmx Acquire, Filter, and Scaling and Conversion. The Windows taskbar at the bottom shows the system time as 3:08 PM on 5/16/2022 and weather as 56°F Rain.

Sensor	Value
Sensor 1 (A)	3.96561
Sensor 2 (A)	1.48920
Sensor 3 (A)	653.230m
Sensor 4 (A)	-6.19704