

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Titulación

Tema: Diseño de hormigones de resistencias altas utilizando
agregado grueso de la mina Pifo, agregado fino de la mina de San
Antonio y cemento HOLCIM HE.

AUTOR:

BRYAN ROBERTO SOLÍS MINDA

SANDRINO GERARDO BRITO MENA

QUITO DM, OCTUBRE DE 2023

Índice de Contenidos

Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vi
Índice de Anexos	vii
Resumen	viii
Abstract.....	ix
1. Capítulo I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Antecedentes	3
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General.....	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. Alcance	7
1.6. Hipótesis	7
2. Capítulo II: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Hormigón de resistencia alta.....	8
2.2. Componentes del hormigón	8
2.2.1. Cemento.....	9
2.2.2. Agregados.....	10
2.2.3. Agua de mezclado	11
2.3. Propiedades físico – mecánico del hormigón fresco	12
2.3.1. Trabajabilidad	12
2.3.2. Consistencia.....	12
2.3.3. Segregación	12
2.3.4. Exudación	12

2.3.5.	Retracción.....	12
2.4.	Propiedades físico – mecánico del hormigón endurecido	13
2.4.1.	Resistencia a la compresión.....	13
2.4.2.	Resistencia a la tracción	13
2.4.3.	Módulo de elasticidad.....	13
2.4.4.	Durabilidad	14
2.4.5.	Porosidad	14
2.4.6.	Densidad	14
2.4.7.	Módulo de rotura	14
3.	CAPITULO III: DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS	15
3.1.	Selección de materiales y descripción de las minas.....	15
3.2.	Propiedades físicas – mecánicas de los agregados	15
3.2.1.	Absorción	15
3.2.2.	Granulometría.....	16
3.2.3.	Porosidad	18
3.2.4.	Abrasión	19
3.2.5.	Contenido orgánico.....	20
3.2.6.	Gravedad Específica	21
4.	Capitulo IV: DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO	23
4.1.	Contexto.....	23
4.2.	Especificaciones técnicas del cemento Holcim HE	23
4.2.1.	Requisitos químicos.....	23
4.2.2.	Requisitos físicos.....	23
5.	Capítulo V: DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN	25

5.1.	Análisis de la resistencia del hormigón	25
5.2.	Diseño de los Hormigones de Resistencias Altas	25
5.2.1.	Control de asentamiento	26
5.2.2.	Moldeo de cilindros	28
5.2.3.	Curado de Cilindros.....	28
5.2.4.	Ensayo de compresión	29
5.3.	Ensayos de las muestras.....	30
5.3.1.	Determinación de la Resistencia a la Compresión	30
5.3.2.	Dosificación.....	30
6.	Capítulo VI: ANALISIS DE RESULTADOS	32
6.1.	Presentación de resultados	32
6.1.1.	Ensayos de compresión y análisis	32
6.1.2.	Ensayos a la tracción por método brasileño	36
6.1.3.	Fecha de.....	36
6.1.4.	Ensayos de Flexo-tracción.....	37
6.1.5.	Ensayos de Módulo de Elasticidad.....	40
7.	Capítulo VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
7.1.	Conclusiones.....	41
7.2.	Recomendaciones	41
8.	Referencias	42
	ANEXOS.....	47

Índice de Tablas

Tabla 3.2.2.1. Resultados Granulometría Agregado Grueso Pifo.....	17
Tabla 4.2.2. Requisitos físicos del cemento Tipo HE de Holcim	24
Tabla 5.3.2.1. Identificación de prueba N°1 y N°2	30
Tabla 5.3.2.2. Dosificación para 20 litros.....	30
Tabla 5.3.2.3. Dosificación para 10 litros.....	31
Tabla 6.1.1.1. Comprensión de muestras de 450 Kg/cm ²	32
Tabla 6.1.1.2. Comprensión de muestras de 500 Kg/cm ²	33
Tabla 6.1.1.3. Comprensión de muestras de 550 Kg/cm ²	34
Tabla 6.1.1.4. Comprensión de muestras de 600 Kg/cm ²	35
Tabla 6.1.2.1. Ensayo brasileño a la muestra de 450 Kg/cm ²	36
Tabla 6.1.2.2. Ensayo brasileño a la muestra de 500 Kg/cm ²	36
Tabla 6.1.2.3. Ensayo brasileño a la muestra de 550 Kg/cm ²	37
Tabla 6.1.2.4. Ensayo brasileño a la muestra de 600 Kg/cm ²	37
Tabla 6.1.4.1. Módulo de rotura de muestras de 450 Kg/cm ²	37
Tabla 6.1.4.2. Módulo de rotura de muestras de 500 Kg/cm ²	38
Tabla 6.1.4.3. Módulo de rotura de muestras de 550 Kg/cm ²	39
Tabla 6.1.4.4. Módulo de rotura de muestras de 600 Kg/cm ²	39

Índice de Figuras

Figura 5.2.1.1. Asentamiento en el cono de Abrahams	27
Figura 5.2.1.2. Pruebas de asentamiento de la mezcla	27
Figura 5.2.4. Ensayos de compresión	29
Figura 6.1.4.1. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 450 Kg/cm ²	38
Figura 6.1.4.2. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 500 Kg/cm ²	38
Figura 6.1.4.3. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 550 Kg/cm ²	39
Figura 6.1.4.4. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 600 Kg/cm ²	40

Índice de Anexos

Anexo 1. Módulo Elástico de muestras de 450 Kg/cm ²	47
Anexo 2. Módulo Elástico de muestras de 500 Kg/cm ²	49
Anexo 3. Módulo Elástico de muestras de 550 Kg/cm ²	51
Anexo 4. Módulo Elástico de muestras de 600 Kg/cm ²	53

Resumen

Con el constante crecimiento de las ciudades, especialmente cuando este crecimiento es de manera vertical, se requiere la construcción de estructuras mayores y más resistentes en las que se pueda introducir un mayor número de personas, ya sea en locales comerciales o en departamentos habitables. Es por ello que esta investigación tiene por objetivo el diseñar hormigones de resistencias altas utilizando componentes que se hallen en nuestro entorno tales como: agregado grueso de la mina Pifo, agregado fino de la mina de San Antonio y cemento HOLCIM HE. Para alcanzar nuestro objetivo, se propone realizar ensayos de compresión, tracción y flexo-tracción en un total de 15 cilindros y 5 vigas para cada dosificación de hormigones de resistencias altas de 450 (44,13), 500 (49,03), 550 (53,94) y 600 kg/cm² (58,84 MPa). Cada resultado obtenido de estos ensayos se consiguió tras realizar los ensayos a lo largo de 3, 7 y 28 días de edad, ya que estos son los tiempos en lo que se estima que las muestras alcanzan la resistencia requerida para el ensayo. Al final de nuestra investigación los resultados más altos de diferentes dosificaciones para hormigones de resistencias altas son de las muestras de hormigón de 600 kg/cm², mismas que después de 28 días de curado fueron capaces de soportar en promedio un total de 699,7 kg/cm² en compresión, 81,7 kg/cm² en tracción y 83,5 kg/cm² en ensayos de flexo-tracción.

Palabras clave: resistencia alta, hormigón, compresión, tracción.

Abstract

With the constant growth of cities, especially when this growth is vertical, the construction of larger and more resistant structures is required in which a greater number of people can enter, either in commercial premises or in habitable apartments. That is why this research aims to design high resistance concrete using components found in our environment such as: coarse aggregate from the Pifo mine, fine aggregate from the San Antonio mine and HOLCIM HE cement. To achieve our objective, it is proposed to carry out compression, traction and flexo-traction tests in a total of 15 cylinders and 5 beams for each dosage of high resistance concrete of 450 (44.13), 500 (49.03), 550 (53.94) and 600 kg/cm² (58.84 MPa). Each result obtained from these tests was achieved after carrying out the tests over 3, 7 and 28 days of age, since these are the times in which it is estimated that the samples reach the resistance required for the test. At the end of our research, the highest results of different dosages for high-strength concrete are from the 600 kg/cm² concrete samples, which after 28 days of curing were able to support a total of 699.7 kg/cm² in compression, 81.7 kg/cm² in traction and 83.5 kg/cm² in flexo-traction tests.

Keywords: high strength, concrete, compression, tensile.

1. Capítulo I: INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Hoy en día, con la aparición de nuevos mecanismos constructivos, empiezan a surgir estructuras más complejas y grandes, al ser Quito una de las ciudades más importantes del Ecuador, se requiere la construcción de estructuras mayores y más resistentes en las que se pueda introducir un mayor número de personas, ya sea en locales comerciales o en departamentos habitables.

Aun así, en el país se siguen usando métodos constructivos antiguos, en los que se utiliza por lo general hormigones que poseen resistencia a compresión de 280 kg/cm^2 ($27,46 \text{ MPa}$), o en el mejor de los casos 350 kg/cm^2 ($34,32 \text{ MPa}$), por lo cual se requiere dar un paso hacia adelante y buscar hormigones de resistencias más altas para el diseño y construcción de estructuras más grandes y seguras, de manera que la ciudad de Quito pueda crecer, sin la necesidad de expandirse de manera horizontal a los valles, el norte o el sur de la ciudad, de esta forma se pueden concebir diseños típicos de ciudades desarrolladas, como rascacielos, donde se encuentran suelos con la suficiente capacidad para soportar dichas estructuras.

De acuerdo a la Normativa Técnica Ecuatoriana (NTE) los hormigones que normalmente se utilizan en la construcción van de los 210 kg/cm^2 ($20,59 \text{ MPa}$) hasta los 350 kg/cm^2 ($34,32 \text{ MPa}$), en la presente investigación se plantea como un estudio de hormigones de resistencias altas como lo serían de 450 ($44,13$), 500 ($49,03$), 550 ($53,94$) y 600 kg/cm^2 ($58,84 \text{ MPa}$), de los cuales carece la ciudad de Quito, hormigones cuyas especificaciones facilitan para el ingeniero la realización de los cálculos estructurales y el modelamiento más preciso de la estructura.

Aun en la actualidad, el estudio de hormigones se encuentra en una continua innovación, principalmente por productos como aditivos que generan cambios en los hormigones que puedan dar en métodos y condiciones de mezcla, y el hormigón de resistencias altas, resultan entonces, una aportación novedosa y necesaria para la construcción de estructuras de mayor calidad y resistencia, teniendo un sinnúmero de ventajas en nuestro ámbito laboral, siendo la más clara la elaboración de estructuras con un mayor grado de resistencia, que puedan soportar mayores cargas y, por lo tanto, se puedan construir estructuras con un mayor índice de resistencia y durabilidad, mismas que puedan brindar mayor seguridad a sus habitantes.

1.2.Planteamiento del Problema

A pesar de haber sido descubierto antes de 1800, hoy en día se sigue utilizando el hormigón como uno de los principales, incluso tal vez el más importante material de construcción en todo el mundo, y aun así día a día se sigue investigando e innovando nuevas maneras de elaborar hormigones con diferentes y específicas características según sea el requerimiento de los constructores. En la actualidad, en todo el mundo se construyen estructuras de gran importancia, principalmente con hormigón, debido a la facilidad constructiva, relativo bajo valor de material y mano de obra no especializada que se requiere en nuestro medio.

En cuanto a los nuevos mecanismos constructivos y técnicas innovadoras que se están utilizando actualmente en la construcción de estructuras más grandes y complejas, es importante destacar que existen una variedad de opciones disponibles. Estas incluyen, por ejemplo, la utilización de materiales de construcción alternativos, como los hormigones de alta resistencia, así como el uso de técnicas de modelado y simulación avanzadas que permiten optimizar el diseño de las estructuras. Asimismo, se están desarrollando nuevas tecnologías de construcción, como las impresoras 3D, que pueden producir componentes estructurales a partir de materiales resistentes y duraderos (Domingo, 2023).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de hormigones de alta resistencia también conlleva ciertos riesgos y desafíos. Por ejemplo, estos materiales pueden ser más propensos a la formación de grietas y fisuras debido a su alta rigidez, lo que puede comprometer la integridad estructural de la construcción. Además, los procesos de mezcla y fraguado de estos materiales pueden requerir un mayor control y supervisión para garantizar que se logre la resistencia deseada. Por lo tanto, es fundamental que los ingenieros y constructores se informen adecuadamente sobre las mejores prácticas para el uso de estos materiales y tomen las precauciones necesarias para garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras (León & Rodríguez, 2022).

En términos de costos y disponibilidad, es cierto que los materiales y tecnologías necesarias para implementar estos nuevos métodos constructivos pueden ser más costosos y difíciles de obtener en comparación con los métodos tradicionales. Sin embargo, es importante considerar que a largo plazo, la inversión en materiales y tecnologías de alta calidad puede resultar en ahorros significativos en mantenimiento y reparaciones. Asimismo, la implementación de nuevas tecnologías y métodos constructivos puede mejorar la eficiencia

y productividad en la construcción, lo que puede reducir los tiempos y costos de construcción (Alvarado, Vélez, Ruiz, Ortiz, & Jarre, 2019).

Gracias a la globalización de la actualidad, el Ecuador se puede guiar por los métodos constructivos estipulados en las normativas de construcción extranjeras, de manera que se pueden aplicar los métodos pertinentes de las normativas, utilizando los datos obtenidos del estudio de materiales propio del entorno ecuatoriano, ya que no es lo mismo utilizar los materiales con los que se realizó el estudio en el que se basa la normativa extranjera, que utilizar los materiales se pueden obtener dentro del propio territorio, por tanto la Normativa Ecuatoriana de Construcción (NEC), solo puede utilizar dichas normativas como base y guía para la elaboración de normativas propias.

La NEC, en lo específico, no menciona hormigones de resistencia mayor a los 350 kg/cm^2 ($34,32 \text{ MPa}$), algunas empresas privadas han realizado estudios de hormigones con mayor grado de resistencia en Guayaquil, otra de las importantes ciudades del Ecuador, el problema es la falta del estudio para la ciudad de Quito, la cual tiene diferentes características tanto en forma como en condiciones en comparación a la costa ecuatoriana en donde se han realizado los estudios para el hormigón de resistencias altas.

Con lo mencionado se espera que este estudio sirva de aporte fundamental para la aplicación de hormigones de resistencias altas en las construcciones dentro de la ciudad de Quito, demostrando que se puede llegar a elaborar estructuras con un mayor grado de confiabilidad, por la resistencia que presenta el material, la durabilidad que se puede proporcionar para la estructura y el grado de seguridad y confianza que genere.

1.3. Antecedentes

Santamaría et al. (2021) en su investigación titulada “Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen”, en su estudio demuestran que utilizar solo una dosificación al volumen, sin considerar las propiedades de los componentes del hormigón, puede tener un impacto negativo en su calidad. Para abordar este problema, se empleó la teoría de diseño de experimentos (DOE) para elaborar diferentes mezclas de hormigón con una misma dosificación al peso, pero empleando diversas propiedades de agregados y tipos de cemento de uso general a disposición en el mercado. Mediante el análisis del diseño factorial y un modelo matemático resultante, se determinó que estos factores tienen un impacto

significativo en la resistencia a la compresión del hormigón (f_c), con una afectación que oscila entre -13,7% y 28,4%. Es importante que tanto los profesionales como los no profesionales de la construcción tomen en cuenta estos resultados y establezcan una dosificación adecuada para cada proyecto en particular.

Esta investigación y el presente estudio, se enfocan en la importancia de utilizar los componentes adecuados en la elaboración del hormigón para lograr una mayor resistencia y calidad en las estructuras construidas. En este caso, utilizando el agregado grueso de la mina Pifo, el agregado fino de la mina de San Antonio y el cemento HOLCIM HE para diseñar hormigones de resistencias altas. La dosificación realizada con las propiedades de los componentes es fundamental para lograr la resistencia deseada, tal como se muestra en el estudio mencionado, que utilizó la teoría de diseño de experimentos para determinar el impacto de diferentes componentes en la resistencia del hormigón. Ambos estudios tienen como objetivo mejorar la calidad y durabilidad de las estructuras construidas a través de la adecuada dosificación y selección de los componentes del hormigón.

En el estudio que lleva por título: “Diseño, producción y colocación del hormigón de mayor resistencia en Argentina”, elaborado por Mansilla et al. (2022), se describe el proceso llevado a cabo en un proyecto en Argentina para producir y colocar hormigón de mayor resistencia, demostrando los avances tecnológicos en la fabricación de este material. Se detallan las diferentes fases del Diseño y Desarrollo (D&D) del producto, desde la elección de los materiales que componen al hormigón, hasta las ensayos ejecutados a escala industrial.

También se exhiben algunos estudios y análisis afines con la generación de calor y su aplicación en elementos estructurales masivos. Además, se describe la implementación de controles para la fabricación y distribución del hormigón, y se discuten los resultados alcanzados en el autocontrol de producción y la calidad de terminación de los elementos estructurales construidos. Por último, se mencionan algunos desafíos y preguntas surgidos durante el proceso, que continuarán siendo abordados en el futuro

La producción y suministro de hormigón con una resistencia superior a 100 MPa constituyó la primera iniciativa de este tipo a nivel de la nación Argentina. Los resultados obtenidos hasta el momento indican, que tanto la metodología utilizada para el diseño y desarrollo, como los controles establecidos durante el proceso de producción y entrega, fueron exitosos y demuestran el progreso alcanzado por la tecnología del hormigón en la elaboración de mezclas con estas propiedades.

Se puede afirmar que este estudio y la presente investigación, están enfocados en la elaboración y desarrollo de mezclas de hormigón con características específicas de resistencia alta, utilizando diferentes componentes y metodologías de diseño y control de calidad. Ambos trabajos buscan avanzar en la tecnología del hormigón para producir mezclas con mejores propiedades, que seguramente comparten algunas metodologías en común.

Los investigadores Cedeño et al. (2022) presentaron un estudio que lleva por nombre: “Combinación de mezclas de agregados gruesos y finos pertenecientes a la Cantera Uruzca para diferentes resistencias de hormigón”, que se centró en la creación de una mezcla de agregados pétreos con el objetivo de utilizarla en el diseño de hormigones con resistencias de 210 kg/cm^2 y 240 kg/cm^2 . Se llevaron a cabo ensayos granulométricos en los materiales obtenidos de la cantera Uruzca y se utilizó un método de tanteo para lograr la mezcla de agregados deseada. Se llevaron a cabo ensayos adicionales de peso específico, peso unitario compactado y suelto, y porcentaje de humedad, todos necesarios para cumplir con el Método ACI 211.1. Se seleccionaron proporciones de materiales finos en una relación 80/20 (80% cisco y 20% arena de banco) para mejorar la graduación y ajustar el módulo de finura dentro del rango de 2.3 a 3.1. Aunque se superaron las resistencias a la compresión, los ensayos de resistividad eléctrica demostraron una alta penetración de cloruros, indicando una durabilidad deficiente en ambientes con alta contaminación. Las proporciones de materiales requeridas para diseñar un hormigón de 210 kgf/cm^2 son de 1 de cemento con 4.36 de agregado grueso y fino, mientras que para una mezcla de 240 kg/cm^2 son 1 de cemento y 3.85 de agregado grueso y fino.

Aun cuando, en este estudio no se consiguió desarrollar hormigón de alta resistencia, en ambas investigaciones, se hace uso de materiales provenientes de canteras o minas para la elaboración de los hormigones y se realizan pruebas y ensayos para asegurar que los materiales seleccionados cumplan con los requerimientos de resistencia y durabilidad necesarios para la aplicación específica.

Finalmente se señala la investigación denominada “Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión”, desarrollada por Bacuilima & Guillén (2019), cuyo estudio fue diseñar un hormigón con resistencia de 1000 kg/cm^2 sin la necesidad de utilizar materiales de granulometría controlada ni fibras. Para lograr esta resistencia, se utilizó el método ACI 211.4R como punto de partida, ya que este método posee valores de referencia para una

resistencia máxima de 843 kg/cm^2 . A partir del diseño inicial para una resistencia de 843 kg/cm^2 , se realizaron modificaciones en la relación a/c y la cantidad de aditivo, entre otros, para lograr la resistencia deseada. Además, se llevaron a cabo ensayos no destructivos y destructivos en el hormigón endurecido, y los resultados mostraron que el hormigón de alta resistencia supera significativamente las características de un hormigón normal.

Por otro lado, se fabricaron vigas de hormigón armado con un $f'c$ de 1000 kg/cm^2 , utilizando el mismo refuerzo de acero y las mismas dimensiones que una viga con un $f'c$ de 450 kg/cm^2 realizada en un proyecto anterior. Se observó que el comportamiento del hormigón de resistencia de 1000 kg/cm^2 en las vigas de hormigón armado fue mejor, ya que estas vigas presentaron falla dúctil, mientras que las vigas con hormigón de 450 kg/cm^2 presentaron falla frágil.

Al igual que el presente estudio, este se enfoca en el diseño y la elaboración de hormigones de alta resistencia sin la incorporación de materiales adicionales como fibras, utilizando diferentes metodologías y técnicas para alcanzar la resistencia deseada. Además, ambos trabajos realizan ensayos y pruebas en el hormigón endurecido para evaluar su resistencia y comportamiento de las mezclas.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar hormigones de resistencias altas utilizando agregado grueso de la mina Pifo, agregado fino de la mina de San Antonio y cemento HOLCIM HE.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Resumir los aspectos teórico más relevantes de los hormigones de alta resistencia.
- Analizar las propiedades y características del agregado grueso de la mina Pifo y el agregado fino de la mina de San Antonio.
- Analizar las propiedades del cemento HOLCIM HE.
- Realizar el diseño de mezclas de hormigones de resistencia alta utilizando los agregados de las minas mencionadas.
- Evaluar los resultados obtenidos con diferentes dosificaciones para hormigones de resistencias altas.

1.5. Alcance

El presente estudio se centra en el diseño correcto de hormigones de resistencias altas para la determinación de las propiedades físico – mecánicas del ensayo de 15 cilindros y 5 vigas de hormigones de resistencias altas de 450 (44,13), 500 (49,03), 550 (53,94) y 600 kg/cm^2 (58,84 MPa). Se realizará el ensayo de compresión simple en 9 cilindros para analizar su comportamiento transcurridas las edades de 3, 7 y 28 días necesarios para obtener la relación tiempo vs resistencia a compresión del hormigón, el ensayo brasileño en 3 cilindros a los 28 días para obtener la resistencia a la tracción, el ensayo de compresión con deformímetro en 3 cilindros para obtener el módulo de elasticidad a los 28 días y el ensayo de flexo-tracción en todas las muestras de vigas a los 28 días.

1.6. Hipótesis

Con la utilización de agregado grueso de la mina de Pifo y agregado fino de la mina de San Antonio se puede elaborar hormigones de resistencias altas, mismas que son verificables mediante ensayos de compresión y tracción en las muestras de hormigones de resistencias altas de 450 (44,13), 500 (49,03), 550 (53,94) y 600 kg/cm^2 (58,84 MPa).

2. Capítulo II: MARCO TEÓRICO

2.1. Hormigón de resistencia alta

El hormigón de resistencia alta se caracteriza por tener una resistencia a la compresión igual o superior a los 50 MPa (509,86 kg/cm²). Este tipo de hormigón se utiliza en estructuras que requieren una gran resistencia, como puentes, edificios de gran altura, presas, entre otros. El hormigón de alta resistencia se logra a través de una adecuada selección de los componentes y una correcta dosificación, así como un adecuado proceso de mezclado, transporte, colocación y curado.

Este tipo de hormigón se utiliza en aplicaciones estructurales que requieren una alta capacidad de carga, y para obtener un hormigón de alta resistencia se requiere una cuidadosa selección y diseño de los componentes y de la mezcla, utilizando materiales de alta calidad y tecnologías avanzadas de producción (Parrales & Quirumbay, 2022).

El hormigón de alta resistencia, se clasifica en función de su resistencia a la compresión, es decir, la capacidad del material para soportar cargas aplicadas en dirección perpendicular a su superficie. Esta resistencia se expresa en unidades de fuerza por unidad de área, como Mega Pascales (MPa) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²).

En general, se considera que el hormigón de alta resistencia, tiene una resistencia a la compresión igual o mayor a 50 MPa o 500 kg/cm². Sin embargo, dependiendo de la normativa de cada país o región, estas cifras pueden variar. En algunos casos, se clasifica el hormigón de alta resistencia en función de su resistencia a la compresión a una edad determinada de 28 días después de su fabricación. En este sentido, se pueden encontrar diferentes clasificaciones según la normativa que se siga (Ojha, et al., 2022).

En cualquier caso, es importante tener en cuenta que la resistencia a la compresión no es el único factor que determina la calidad del hormigón de alta resistencia. Otros aspectos importantes a considerar son la durabilidad, trabajabilidad, permeabilidad y resistencia a otros tipos de cargas, como la flexión o el corte.

2.2. Componentes del hormigón

La norma INEN 694: Hormigón y Áridos para elaborar Hormigón. Terminología, define al hormigón como un “Material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante en el que están embebidos partículas y fragmentos de áridos. En el hormigón de cemento

hidráulico, el aglutinante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua” (Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, 2010, p. 6)

El hormigón de alta resistencia, se compone de los mismos materiales que el hormigón convencional, es decir, agregados (grava y arena), cemento y agua. Sin embargo, la diferencia radica en las proporciones y el uso de materiales de mayor calidad y resistencia.

En el hormigón de alta resistencia, se utiliza una proporción menor de agua en relación al cemento, lo que lo hace más denso y resistente. Además, se pueden utilizar agregados de alta calidad y dureza, como cuarzo o granito triturado, en lugar de la grava común, lo que aumenta su resistencia (Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, 2015).

Otro factor que influye en la resistencia del hormigón de alta resistencia es la calidad del cemento utilizado. En general, se utiliza un cemento de alta resistencia, que tiene un mayor contenido de Clinker y una menor cantidad de yeso, lo que lo hace más resistente y duradero.

2.2.1. Cemento

El cemento es un material aglomerante utilizado para la elaboración de hormigón y otros materiales de construcción. Se produce a partir de la mezcla de materiales naturales como la piedra caliza, la arcilla y la arena, que son sometidas a altas temperaturas en un horno especializado. Este proceso de calentamiento, conocido como clinkerización, permite la fusión de los materiales y la obtención del Clinker, un material granulado que posteriormente se muele y se mezcla con yeso y otros aditivos para obtener el cemento final.

El cemento se define como un componente del hormigón porque es el material que se utiliza para unir los agregados (grava, arena, etc.) y formar una masa sólida y resistente. En la elaboración del hormigón, se mezcla el cemento con los agregados y el agua, lo que permite que se produzca una reacción química que da lugar a la formación de una masa endurecida y resistente. El tipo de cemento a utilizar de las características requeridas en el hormigón, como resistencia, durabilidad, trabajabilidad, entre otras. El cemento hidráulico se define de acuerdo a la norma INEN 151. Cemento hidráulico. Definición de términos, como “Cemento que fragua y endurece por reacción química con agua y es capaz de hacerlo aún bajo el agua” (Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, 2010, p. 3)

En el caso del hormigón de alta resistencia, se utiliza un cemento de alta calidad, que le confiere una mayor capacidad de soportar cargas y una mayor durabilidad, con un mayor contenido de Clinker y menor cantidad de yeso, lo que lo hace más resistente y duradero.

Además, se utilizan proporciones y materiales de alta calidad en la mezcla del hormigón, lo que aumenta su resistencia y capacidad de carga (López & Ontaneda, 2021).

2.2.2. Agregados

Los agregados son materiales pétreos como la grava, la arena y la piedra partida que se utilizan para dar cuerpo al hormigón. Los agregados pueden ser de origen natural o artificial y se clasifican según su tamaño en agregado grueso y agregado fino. El tamaño y la forma de los agregados influyen en las propiedades del hormigón, como la resistencia, la durabilidad, la trabajabilidad y la densidad.

Los agregados son materiales granulares, es decir que se presentan en forma de gránulos o partículas, como la grava, la arena y la piedra partida, que se utilizan en la elaboración del hormigón para darle volumen, estabilidad y resistencia. Los agregados pueden ser de origen natural o artificial y se clasifican en dos tipos principales: finos y gruesos.

Los agregados finos son aquellos que pasan por un tamiz de malla de 4,75 mm y se retienen en uno de malla de 0,075 mm. Los más comunes son la arena natural o de trituración, el polvo de piedra, la escoria de alto horno y la ceniza volante. Por otro lado, los agregados gruesos son aquellos que no pasan por un tamiz de malla de 4,75 mm y se retienen en uno de malla de 5 mm o 10 mm. Los más utilizados son la grava natural o de trituración, el canto rodado, el granito, la piedra pómez y la escoria de alto horno (Vega & Medina, 2022).

En cuanto a la proporción de los agregados en la mezcla de hormigón, depende de varios factores, como el tipo de estructura, la resistencia requerida, la densidad y la trabajabilidad deseada. En general, se utiliza una proporción de 60-75% de agregados gruesos y 25-40% de agregados finos. Los agregados se obtienen de canteras naturales o de la trituración de rocas, y suelen ser transportados a la planta de hormigón en camiones. Es importante asegurar la calidad de los agregados y comprobar que cumplan con las normativas y estándares de calidad requeridos.

En un hormigón de alta resistencia, los agregados pueden cambiar tanto en su proporción como en su calidad en comparación con un hormigón convencional. En cuanto a la proporción, en un hormigón de alta resistencia se puede utilizar una menor cantidad de agregados finos para mejorar la compactación y la trabajabilidad, y una mayor cantidad de agregados gruesos para aumentar la resistencia. También se pueden utilizar agregados de

diferentes tamaños y formas para lograr una distribución más homogénea de los mismos en la mezcla (Montero & Román, 2022).

Además, al origen de extracción de los agregados, esto puede tener un impacto en la calidad del hormigón. Los agregados de origen natural, como la grava y la arena, pueden variar en calidad y resistencia dependiendo de su ubicación geográfica y las condiciones geológicas en las que se formaron. Por lo tanto, es importante seleccionar cuidadosamente los agregados para asegurar que cumplan con los requisitos de calidad y resistencia necesarios para el hormigón de alta resistencia.

2.2.3. Agua de mezclado

El agua es un componente fundamental del hormigón y se utiliza para hidratar el cemento y activar su proceso de fraguado, permitiendo que este se endurezca. La cantidad y calidad del agua utilizada en la mezcla de hormigón es un factor crítico que afecta directamente las propiedades físicas y mecánicas del hormigón endurecido, como su resistencia, durabilidad y trabajabilidad. Un exceso de agua puede afectar negativamente las propiedades del hormigón, como la resistencia y durabilidad, mientras que una cantidad insuficiente puede afectar la trabajabilidad y compactación del hormigón.

La normativa que regula el agua de mezclado en el hormigón varía según el país o región, pero en general se rige por normas de calidad del agua, tales como la norma ISO 5667-3 (2018) Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua, o la NTE INEN 1108 (2020) Agua para consumo humano. Requisitos, que establecen los requisitos mínimos de calidad para el agua potable.

Además, las normas que regulan el hormigón en Ecuador, NTE INEN 1855-1 (2015) Hormigones. Hormigón premezclado. Requisitos y NTE INEN 1855-2 (2015) Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos, establecen los requisitos para el agua de mezclado en el hormigón. Estas normas indican que el agua debe ser potable y libre de materiales que puedan afectar la calidad del hormigón, como aceites, grasas, ácidos, álcalis o sustancias orgánicas.

En cuanto a la proporción de agua utilizada en la mezcla de hormigón, esta puede variar según el tipo de hormigón y las características específicas del proyecto de construcción. La cantidad de agua debe ser suficiente para garantizar que la mezcla tenga la trabajabilidad necesaria para su colocación y compactación, pero sin comprometer la resistencia y

durabilidad del hormigón. En general, se recomienda utilizar la menor cantidad de agua posible que permita una adecuada trabajabilidad y compactación, siguiendo las recomendaciones del diseño de la mezcla.

2.3. Propiedades físico – mecánico del hormigón fresco

El hormigón fresco es aquel que aún no ha endurecido y que se encuentra en un estado plástico o semilíquido durante la colocación y el proceso de compactación. Algunas de las propiedades físico-mecánicas del hormigón fresco son:

2.3.1. *Trabajabilidad*

Propiedad implicada con la facilidad con la que se puede colocar y compactar el hormigón. Una buena trabajabilidad es importante para garantizar una colocación uniforme y una buena adherencia al armado.

2.3.2. *Consistencia*

Viene asociada a la fluidez o rigidez del hormigón fresco. La consistencia adecuada del hormigón es importante para lograr una buena trabajabilidad y la resistencia adecuada, después que el hormigón endurezca (Aidarov, Mena, & Fuente, 2022).

2.3.3. *Segregación*

Se refiere a la separación de los componentes del hormigón, especialmente la separación del agua y los agregados. La segregación puede afectar la calidad del hormigón y reducir su resistencia.

2.3.4. *Exudación*

Se define como la liberación de agua hacia la superficie del hormigón fresco debido a la presión del aire atrapado en la mezcla. La exudación puede provocar una pérdida de la relación agua-cemento y una reducción de la resistencia del hormigón (Ramos & Sueldo, 2021).

2.3.5. *Retracción*

Describe la contracción del hormigón durante el proceso de fraguado y endurecimiento. La retracción puede causar grietas en el hormigón y afectar su durabilidad y resistencia (Moya & Cando, 2019).

Es importante controlar estas propiedades durante el proceso de colocación y compactación del hormigón fresco para garantizar la calidad y resistencia adecuadas del hormigón una vez que endurezca.

2.4. Propiedades físico – mecánico del hormigón endurecido

El hormigón endurecido es aquel que ha pasado por el proceso de fraguado y ha adquirido su resistencia nominal adecuada. Algunas de las propiedades físico-mecánicas del hormigón endurecido son:

2.4.1. Resistencia a la compresión

Definida como la capacidad del hormigón para resistir cargas de compresión. La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas más importantes del hormigón endurecido y se mide en unidades de presión (MPa, kg/cm² o PSI) (Muñoz, Cabrera, Delgado, & Renilla, 2022). Algunos valores de referencia típicos son:

- Hormigón convencional: 20-40 MPa
- Hormigón de alta resistencia: >50 MPa
- Hormigón de ultra alta resistencia: >150 MPa

2.4.2. Resistencia a la tracción

Se trata de la capacidad del hormigón para resistir cargas de tracción. El hormigón es un material frágil y tiene una resistencia a la tracción mucho menor que su resistencia a la compresión (Quispe & Verástegui, 2019). Algunos valores típicos son:

- Hormigón convencional: 2-5 MPa
- Hormigón de alta resistencia: 5-10 MPa

2.4.3. Módulo de elasticidad

Consiste en la capacidad del hormigón para deformarse elásticamente bajo carga y recuperar su forma original una vez que se retira la carga. El módulo de elasticidad se relaciona con la rigidez del hormigón y se mide en unidades de presión, depende de la resistencia a la compresión del material y suele ser alrededor de 30-40 GPa (Egoavil, 2022).

2.4.4. Durabilidad

Corresponde a la capacidad del hormigón para resistir la acción de los agentes agresivos del ambiente, como la humedad, la lluvia, el hielo, la corrosión, entre otros. La durabilidad es una propiedad importante para garantizar la vida útil del hormigón.

2.4.5. Porosidad

Alude a la cantidad de poros o vacíos en el interior del hormigón. La porosidad afecta la resistencia del hormigón a la penetración de agua y otros agentes agresivos y, por lo tanto, su durabilidad. Los valores típicos de referencia para la porosidad del hormigón oscilan entre el 5% y el 20%, dependiendo de la calidad de la mezcla y las condiciones de curado (Bacuilima & Guillén, 2019).

2.4.6. Densidad

Se refiere a la cantidad de masa por unidad de volumen del hormigón endurecido. La densidad del hormigón depende de los materiales utilizados en la mezcla y puede variar entre 2200 y 2600 kg/m³. La densidad del hormigón es importante para calcular la masa y el volumen de las estructuras de hormigón, así como para determinar su resistencia a la penetración de agua y otros agentes agresivos (Lozano & Tabango, 2019).

2.4.7. Módulo de rotura

Es la capacidad del hormigón para resistir cargas de flexión antes de la rotura. Es una medida de la resistencia del hormigón a la tensión y se mide en unidades de presión. El módulo a la rotura se utiliza para diseñar elementos estructurales de hormigón que están sujetos a cargas de flexión, como vigas, losas y columnas. Los valores típicos de referencia para el módulo de rotura del hormigón oscilan entre 3,5 y 6,5 MPa para el hormigón convencional, y pueden superar los 10 MPa para el hormigón de alta resistencia (Huamán, Rodríguez, & Díaz, 2022).

Estas propiedades pueden variar según la composición y las proporciones de los materiales utilizados en la mezcla, el proceso de fabricación y las condiciones ambientales a las que está expuesto el hormigón endurecido. Es importante garantizar una buena calidad del hormigón durante el proceso de fabricación, colocación y el curado para lograr las propiedades físico-mecánicas deseadas.

3. CAPITULO III: DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

3.1. Selección de materiales y descripción de las minas.

Los materiales utilizados en esta investigación provienen de dos minas diferentes. La primera es la Mina Tanlahua, situada a 6 kilómetros al noroeste de San Antonio de Pichincha, en el borde sureste del cráter Pululahua. Esta mina se encuentra en un valle rodeado de cordilleras y la actividad principal en esta área ha sido la extracción de rocas y minerales. En esta zona, se pueden encontrar piroclastos de la formación Cangahua y brechas comagmáticas. En San Antonio de Pichincha, la Mina Tanlahua ofrece granito como producto comercial, el cual presenta claros indicios de meteorización causados por compresiones intensas, tensiones ocasionadas por movimientos corticales y la exposición a altas temperaturas.

La segunda mina es de Pifo y está situada en la Parroquia de Pifo, en la provincia de Pichincha, al nororiente de la ciudad de Quito, en las cercanías del valle creado por el río Guambi. En lo que respecta al material extraído de esta mina, se trata de "Andesita Basáltica", una roca ígnea extrusiva que exhibe propiedades mecánicas favorables. La roca madre exhibe dos variaciones de color bien definidas: un tono rojizo pálido y otro blanquecino, ambos con características y desempeño similares. En contraste con la mina de San Antonio, el agregado de la Mina de Pifo es de granulometría gruesa (Chango & Tulcán, 2018).

3.2. Propiedades físicas – mecánicas de los agregados

3.2.1. Absorción

La capacidad de absorción en agregados se refiere a la capacidad de un material agregado, como arena, grava o piedra triturada, para absorber agua. Es una medida de la cantidad de agua que puede retener un agregado en relación con su peso o volumen. La capacidad de absorción es importante en aplicaciones como la mezcla de concreto y mortero, ya que afecta la cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla adecuada y las propiedades del material endurecido.

Es posible establecer la cantidad adecuada de agua a utilizar en un volumen unitario de hormigón, siguiendo las normas correspondientes. Para el agregado fino, se puede emplear

la norma NTE INEN 856 (2010), mientras que para el agregado grueso, se puede recurrir a la norma NTE INEN 857 (2010).

La capacidad de absorción se calcula utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 3.2.1. Capacidad de Absorción

$$CA = \frac{\text{Peso seco del agregado} - \text{Peso saturado y sumergido del agregado}}{\text{Peso seco del agregado}} \times 100 \%$$

En esta ecuación, el peso seco del agregado se refiere al peso del agregado después de secarlo completamente, mientras que el peso saturado y sumergido del agregado se refiere al peso del agregado después de sumergirlo completamente en agua y permitir que se sature. El resultado se expresa como un porcentaje de la capacidad de absorción del agregado. En las tablas 3.2.1.1 y 3.2.1.2 se muestran los valores de los agregados grueso y fino.

Tabla 3.2.1.1. Capacidad de Absorción Agregado Grueso Pifo

Resultados Ensayo de Capacidad de Absorción	
Origen: Mina Pifo	Agregado: Piedra N°67 Rosa
Densidad del agregado seco	2403,7 kg/m ³
Densidad del agregado saturado y sumergido	2507,9 kg/m ³
Capacidad de Absorción	4,2 %

Tabla 3.2.1.2. Capacidad de Absorción Agregado Fino San Antonio

Resultados Ensayo de Capacidad de Absorción	
Origen: Mina San Antonio	Agregado: Arena Azul
Densidad del agregado seco	2431,8 kg/m ³
Densidad del agregado saturado y sumergido	2532,6 kg/m ³
Capacidad de Absorción	4,0 %

3.2.2. Granulometría

La granulometría se refiere al estudio y descripción de la distribución de tamaños de las partículas que conforman un agregado o material granular, como arena, grava o piedra triturada. En otras palabras, la granulometría se encarga de analizar y clasificar las partículas según su tamaño. Para determinar la granulometría de un agregado, se realiza un análisis

granulométrico en el cual se separan las partículas en diferentes fracciones de tamaño utilizando tamices de malla de tamaño específico. Luego, se pesa cada fracción para determinar la proporción de material que se encuentra en cada rango de tamaño, de acuerdo al NTE INEN 696 (2010), los resultados se muestran en las tablas 3 y 4.

Tabla 1.2.2.1. Resultados Granulometría Agregado Grueso Pifo

Resultados Ensayo de Granulometría						
Origen: Mina Pifo		Agregado: Piedra N°67		Masa (g): 10486		
Tipo de Tamiz	Tamaño del Tamiz (mm)	Retenido		Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa	Limites especificado
		Parcial (gramos)	Acumulado (gramos)			
½"	37,5	-	-	-	-	100
1"	25	0	0	0	100	95 a 100
¾"	19	406	406	4	96	-
½"	12,5	-	-	-	-	25 a 60
3/8"	9,5	5782	6188	59	41	-
N°4	4,75	3386	9574	92	8	0 a 10
N°8	2,36	602	10176	97	3	0 a 5
Band	-	276	10452	100	0	0
Masa Final (g): 10452			Módulo de Finura: 6,41			

Tabla 3.2.2.2. Resultados Granulometría Agregado Fino San Antonio

Resultados Ensayo de Granulometría						
Origen: Mina San Antonio		Agregado: Arena Azul		Masa (g): 621,8		
Tipo de Tamiz	Tamaño del Tamiz (mm)	Retenido		Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa	Limites especificado
		Parcial (gramos)	Acumulado (gramos)			
3/8 "	9,50	0,0	0,0	0	100	100
N° 4	4,75	2,3	2,3	0	100	95 a 100
N° 8	2,36	90,2	92,5	15	85	80 a 100
N° 16	1,18	135,9	228,4	37	63	50 a 85
N° 30	0,6	119,4	347,8	56	44	25 a 60
N° 50	0,3	98,5	446,3	72	28	5 a 30
N° 100	0,15	68,9	515,2	83	17	0 a 10
Band	-	106,2	621,4	100	0	0
Masa Final (g): 621,4			Módulo de Finura: 2,63			

3.2.3. Porosidad

La porosidad es una medida de la cantidad de espacio poroso, o poros, presente en un material. Se refiere a la proporción de volumen ocupado por los poros con respecto al volumen total del material. Los poros pueden ser espacios vacíos entre partículas, grietas o cavidades dentro de la estructura del material.

La porosidad es una propiedad importante que puede influir en las características y el comportamiento de diversos materiales, como rocas, suelos, cerámicas y materiales porosos en general. Algunas de las aplicaciones en las que la porosidad es relevante incluyen la filtración, la absorción de líquidos, la capacidad de retención de agua, la permeabilidad, la resistencia mecánica y la capacidad de aislamiento térmico.

La porosidad se puede establecer mediante diferentes métodos de medición, dependiendo del tipo de material y los objetivos de la evaluación. Algunos de los métodos comunes incluyen:

- Método de desplazamiento de líquidos: Se mide el volumen de líquido que penetra en los poros del material y se compara con el volumen total.
- Método de inmersión y desplazamiento de gases: Se mide el volumen de gas que se desplaza al sumergir el material en un recipiente y se compara con el volumen total.
- Método de densidad aparente: Se mide la densidad del material y se compara con la densidad del material completamente sólido para calcular la porosidad.
- Método de imágenes por microscopía o tomografía: Se utilizan técnicas de imágenes para visualizar y cuantificar los poros en el material.

La pasta hidratada presenta una variedad de tamaños de poros, que abarcan desde la escala subnanométrica hasta la escala micrométrica, tal como se ilustra en la tabla 3.2.3.

Tabla 3.2.3. Clasificación por escala de los poros

Denominación	Diámetro	Descripción	Rol del agua	Propiedad afectada
Poros capilares	10-0,05 μm	Capilares grandes	Se comporta como agua libre	Resistencia, permeabilidad
	20–10 nm	Capilares medianos	Genera moderada fuerza	Resistencia, permeabilidad,

			de tensión superficial	contracción a alta humedad
	10–2,5 nm	Pequeños capilares	Genera elevadas fuerzas de tensión superficial	Contracción a 50 % HR
Poros de gel	2,5–0,5 nm	Microporos	Agua fuertemente absorbida, no forma menisco	Contracción por secado, creep
	<~0,5 nm	Microporos entre laminas	Agua estructural involucrada en las uniones	Contracción por secado, creep

Fuente: (Mattio, 2014)

3.2.4. Abrasión

La abrasión en los agregados se refiere al desgaste o deterioro de la superficie principalmente del agregado grueso debido a la fricción causada por el contacto con otros materiales, entre el mismo material, la erosión por agua u otros agentes abrasivos. Este desgaste puede provocar la pérdida de capas superficiales del agregado, debilitando su resistencia y afectando su calidad.

La abrasión en el agregado grueso puede manifestarse de diferentes formas, como el desgaste superficial, el agrietamiento, la formación de huecos o la erosión de partículas finas. Los factores que influyen en la abrasión del hormigón incluyen la dureza y rugosidad de la superficie, la composición del hormigón, la exposición a agentes abrasivos y la frecuencia y tipo de carga aplicada.

Para evaluar la resistencia a la abrasión del agregado, se realizan pruebas específicas, como el ensayo de abrasión por desgaste de Los Ángeles o el ensayo de desgaste por frotamiento con arena. Estas pruebas proporcionan datos cuantitativos sobre la pérdida de masa o volumen del agregado expuesto a la abrasión, lo que permite determinar su resistencia y comparar diferentes mezclas o tratamientos superficiales de acuerdo a lo señalado en la

Norma Ecuatoriana Vial, NEVI-12 (2013) y la NTE INEN 860 (2011). Los resultados del ensayo de abrasión se muestran en la tabla 3.2.4.

Tabla 3.2.4. *Resultados Abrasión Agregado Grueso Pifo*

		Resultados Ensayo de Abrasión	
Origen: Mina Pifo		Agregado: Piedra N° 67	Gradación: B
N°	Descripción	Cantidad	Unidad
1	Masa de la muestra de Agregado Preparada	5000	g
2	Masa Retenida en el tamiz N° 12 después de 100 revoluciones	3684	g
3	Masa Perdida después de 100 revoluciones	1316	g
4	Porcentaje de Perdida después de 100 revoluciones	26,3	%
5	Varianza (Coef. Uniformidad)	2,1	

3.2.5. *Contenido orgánico*

El ensayo de contenido orgánico se utiliza para determinar la cantidad de materia orgánica presente en un suelo o en una muestra de material. La materia orgánica está compuesta principalmente por residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición. El ensayo de contenido orgánico generalmente implica el calentamiento de una muestra de suelo o material a una temperatura específica, generalmente alrededor de 550 °C, en un horno de mufla o similar. Durante este proceso de calentamiento, la materia orgánica se descompone y se volatiliza, dejando un residuo de cenizas. La diferencia entre el peso inicial de la muestra y el peso de las cenizas después de la calcinación se utiliza para determinar el contenido de materia orgánica.

El resultado del ensayo se expresa típicamente como un porcentaje de contenido orgánico en relación con el peso de la muestra original. El contenido de materia orgánica en el suelo puede tener implicaciones importantes para la fertilidad del suelo, la capacidad de retención de agua, la estructura del suelo y otros aspectos relacionados con la salud y el rendimiento de los cultivos. Todo este ensayo se regula por medio de la NTE INEN 855 (2010). En la tabla 7 se muestran los resultados del ensayo de contenido orgánico.

Tabla 3.2.5. Resultados Contenido Orgánico Agregado Fino San Antonio

Resultados Ensayo de Contenido Orgánico	
Origen: Mina San Antonio	Agregado: Arena Azul
Color determinado a las 24 horas	Amarillo Pálido
Observaciones	Arena con poca presencia de materia orgánica, limos o arcillas. Se considera de buena calidad.

3.2.6. Gravedad Específica

La gravedad específica es una medida que se utiliza para comparar la densidad de una sustancia en relación con la densidad del agua a una temperatura específica. Es una relación adimensional y se representa como un número mayor o igual a 1. El ensayo de gravedad específica se realiza para determinar la gravedad específica de un material, como suelo, agregado o sustancia líquida. El ensayo generalmente implica dos mediciones: la masa del material seco y la masa del material sumergido en agua.

El procedimiento típico para realizar el ensayo de gravedad específica implica los siguientes pasos:

- Obtener una muestra representativa del material y se seca completamente para eliminar toda la humedad.
- Se mide y registra la masa seca de la muestra.
- Sumergir completamente la muestra seca en agua y se mide y registra la masa sumergida.
- Calcular la gravedad específica utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 3.2.6. Gravedad Específica

$$\text{Gravedad específica} = \frac{\text{Masa seca del material}}{\text{Masa sumergida del material} - \text{Masa seca del material}}$$

El resultado del ensayo de gravedad específica es un número adimensional. Si la gravedad específica es igual a 1, significa que el material tiene la misma densidad que el agua. Si la gravedad específica es mayor que 1, el material es más denso que el agua, y si es menor que 1, el material es menos denso que el agua. El ensayo de gravedad específica es importante en varias aplicaciones, como la caracterización de suelos en ingeniería civil, la selección de

agregados para la fabricación de concreto y el control de calidad de líquidos en diversas industrias. En este caso las normas que los regulan, son la NTE INEN 856 (2010) y la NTE INEN 857 (Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, 2010). Las tablas 3.2.6.1 y 3.2.6.2 muestran los resultados de dichas gravedades específicas en los materiales de estudio.

Tabla 3.2.6.1. Resultados Gravedad Específica Agregado Fino San Antonio

Resultados Ensayo de Gravedad Específica	
Origen: Mina San Antonio	Agregado: Arena Azul
Masa seca del material	668,6 g
Masa sumergida del material	978,5 g
Gravedad específica	2,16

Tabla 3.2.6.2. Resultados Gravedad Específica Agregado Grueso Pifo

Resultados Ensayo de Gravedad Específica	
Origen: Mina Pifo	Agregado: Piedra N°67
Masa seca del material	4963,7 g
Masa sumergida del material	3113,0 g
Gravedad específica	2,68

4. Capítulo IV: DETERMINACIÓN EN LABORATORIO DE LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO

4.1.Contexto

Este tipo de cemento de la marca Holcim corresponde a una línea premium denominada de “Tipo HE”, principalmente usado con fines hidráulico debido a su alta resistencia, este es fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380, que equivale a la Norma ASTM C1157 (Briones & Mora, 2022). Esta directriz permite fabricar cementos con adiciones basados en su desempeño, que minimizan el impacto ambiental y dan como resultado un uso muy eficiente de las materias primas.

Este cemento tipo HE está compuesto de clínker de cemento portland, yeso y adiciones de puzolanas naturales, se caracteriza por ser de desencofrado rápido y que produce altas resistencias tempranas, similares a las resistencias del cemento portland Tipo III de la Norma ASTM C150. Se lo llama HE por sus siglas en inglés de “high early-strength” (alta resistencia temprana), lo que lo hace ideal para fabricar hormigones con mayores resistencias mecánicas, edificar estructuras en zonas de alto riesgo sísmico, centrales hidroeléctricas, pavimentos y obras de infraestructura en general (Holcim, 2015).

4.2.Especificaciones técnicas del cemento Holcim HE

4.2.1. Requisitos químicos

La composición química para el cemento no está especificada en la NTE INEN 2380, sin embargo, los constituyentes individuales molidos y mezclados para producirlo son analizados.

4.2.2. Requisitos físicos

Entre los requisitos más destacados y mencionados por la misma empresa Holcim (2015) están los expuestos en la Tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.22. *Requisitos físicos del cemento Tipo HE de Holcim*

	INEN 2380	Holcim HE
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0,80	-0,04
Tiempo de fraguado, método de Vicat		
No menos de [mín.]	45	150
No más de [mín.]	420	150
Contenido de aire del mortero en volumen, %		3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	12	14
3 días	24	25
7 días	-	32
28 días	-	40
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0,020	0,001

5. Capítulo V: DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

5.1. Análisis de la resistencia del hormigón

Las propiedades de cada elemento que conforma el hormigón influyen de manera directa en su resistencia, trabajabilidad y durabilidad, por lo cual es necesario el estudio de los agregados y del cemento, así como también la cantidad de agua; hay que tomar en cuenta que el presente estudio pretende optimizar cada elemento que conforma el hormigón disminuyendo su costo, pero sin afectar sus propiedades.

Una adecuada dosificación se seleccionó para producir un hormigón de las siguientes características:

- De las más rígidas consistencias (el menor asentamiento), que se puede colocar eficientemente a modo de obtener una masa homogénea.
- Con el tamaño de los agregados establecidos en las normas técnicas, para obtener una mayor economía y resistencia.
- Durabilidad suficiente para soportar satisfactoriamente la intemperie y otros agentes destructivos a los que está expuesto.
- Que tenga la resistencia requerida para soportar las cargas impuestas sin peligro de falla.

5.2. Diseño de los Hormigones de Resistencias Altas

La fabricación de la mezcla, es un proceso que consiste en tres pasos interrelacionados:

- a) Selección de los constituyentes del hormigón
- b) Determinación de sus cantidades relativas para producir, lo más económicamente posible, un hormigón de las características apropiadas, tanto en estado fresco como endurecido.
- c) Ajuste de las cantidades estimadas mediante el ensayo de especímenes de prueba.

Aunque muchas de las propiedades de los hormigones son importantes, la mayoría de los métodos están dirigidos a la obtención de cierta resistencia a la compresión, con una consistencia determinada. Se asume que, si esto se logra con éxito y el hormigón está bien especificado, las otras propiedades también serán satisfactorias.

En general, si se satisfacen las condiciones de trabajabilidad en estado fresco, los requisitos de resistencia y durabilidad en estado endurecido y la mezcla es económica, el diseño de la mezcla es exitoso. No obstante, hay veces en las que las exigencias de la obra imponen consideraciones adicionales, como por ejemplo límites a la elevación de temperatura de la masa de hormigón, límites en el valor de las contracciones para evitar fisuración, elevada dureza superficial para soportar fenómenos de erosión, etc. Estos casos son especiales y deben ser tratados como tales.

En el presente estudio, se analizó el comportamiento de diferentes dosificaciones de mezcla de hormigón, tales mezclas fueron fabricadas en laboratorio, para su posterior comparación. Las variables consideradas en la fabricación de la mezcla fueron la cantidad de cemento y agregado a utilizarse, descenso en el cono de abrahams y su resistencia a los 28 días. Para la fabricación de la mezcla del hormigón, sus elementos tienen que estar secos y libre de impurezas como se mencionó con anterioridad, y la combinación de los materiales se lo puede hacer mediante maquinas o a mano; al utilizar la mezcladora, ésta debe estar limpia y sin restos de hormigón por dentro ya que puede alterar la cantidad de agua a utilizarse.

Los agregados y el cemento tienen que ser combinados en proporciones de acuerdo al número mínimo de cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para este estudio. A fin de asegurar la trabajabilidad del hormigón fresco, así como también la hidratación del cemento, el agua de amasado debe mojar completamente la superficie de los granos de la mezcla. Es entonces interesante observar los constituyentes del hormigón, desde la óptica de la superficie que aporta. En este sentido, sin duda, el cemento es el elemento dominante, además es el único componente capaz de reaccionar con el agua y desarrollar resistencia mecánica.

Es visible y se puede notar con mayor facilidad, que la mezcla de los elementos se está realizando de manera adecuada, y que estos van conformando en una masa uniforme.

5.2.1. Control de asentamiento

El control de asentamiento, consiste en colocar una muestra de hormigón recién mezclado dentro del cono de Abrahams; el molde se levanta, y se deja que el hormigón se desplome; se mide la distancia vertical al centro desplazado y se registra el valor del asentamiento del hormigón; este método es más conocido como método del cono de Abrahams ASTM 143 (ASTM, 2008). La mezcla tiene que ser verificada constantemente, midiendo que el asentamiento esté dentro del rango establecido, la misma que puede ser visible de acuerdo a

la trabajabilidad y ante la práctica y experiencia de quienes están manipulando o mezclando el hormigón.

Una vez que la mezcla haya formado una sola pasta, y que se observe que se puede realizar la prueba de asentamiento; se procede a ingresar el hormigón en el cono de Abrahams en tres etapas; se ingresa la primera capa de hormigón hasta la tercera parte del cono, y se hinca 25 veces dentro del cono con ayuda de una barra metálica e punta redonda, con el fin de uniformizar el hormigón y que no quede espacios vacíos; el mismo procedimiento se realiza al colocar las dos terceras partes del hormigón y hasta cuando esté completamente lleno. Se enraza el recipiente con ayuda de la barra metálica, se alza el cono en forma vertical, se lo coloca en forma invertida, para con ayuda de un flexómetro obtener la medida del filo de la barra hasta el punto máximo de deflexión del hormigón; el cual determinará si el descenso es el esperado.

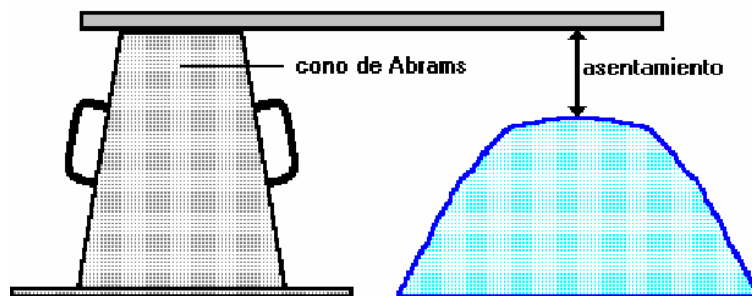


Figura 5.2.1.1. Asentamiento en el cono de Abrahams



Figura 5.2.1.2. Pruebas de asentamiento de la mezcla

5.2.2. Moldeo de cilindros

Los moldes que se ocuparán en este estudio tienen una medida de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, en las cuales se procederá a colocar el hormigón en dos capas; la primera capa ocupa la mitad del cilindro y se debe hincar con una barra metálica, 25 veces, con el fin de que no quede espacios vacíos, el mismo procedimiento se hace en la mitad y hasta cuando el cilindro este completamente lleno (ASTM C 172) (ASTM, 2008).

Para cuando el cilindro este completamente lleno se enrasa y con ayuda de un mazo con cabeza de hule o caucho se golpea varias veces alrededor del cilindro para sacar el aire que queda atrapado. Se deja reposar los cilindros de 12 a 24 horas; tiempo en el cual el hormigón se ha endurecido lo suficiente para ser desmoldado.

La temperatura no deberá ser inferior a los 20°C ni superior a los 27°C en el sitio en que se guarden las probetas. Las muestras que se dejen en el sitio de trabajo durante varios días a temperaturas bajas o altas darán resultados erróneos.



Figura 5.2.2. Moldeo de la mezcla

5.2.3. Curado de Cilindros

Después del fraguado se desmoldan las probetas y se colocan en un ambiente de saturación (100% de humedad relativa), en agua a una temperatura entre 20°C ± 2°C (ASTM C31) (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010). Se debe tener mucho cuidado en el desmoldado del cilindro ya que este puede sufrir roturas en caso de mal manejo; o golpes que pueda tener el cilindro de hormigón.

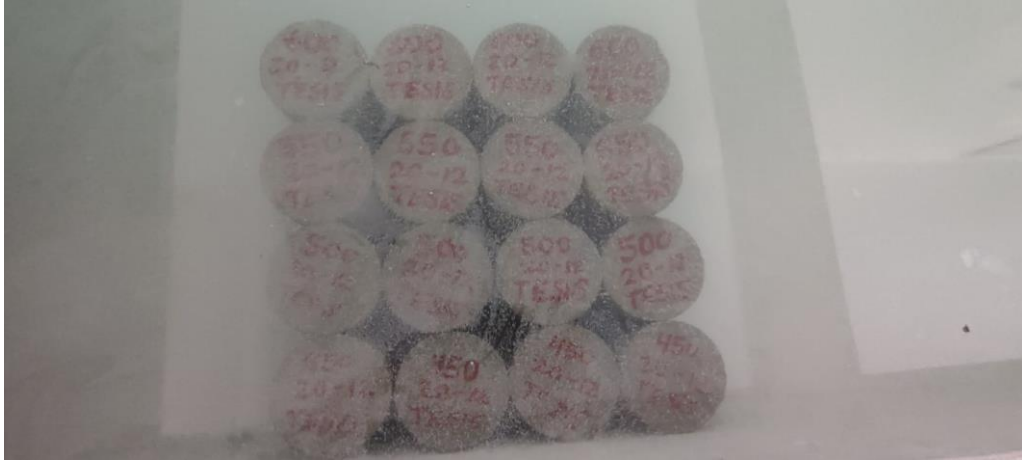


Figura 5.2.3. Curado de cilindros

5.2.4. Ensayo de compresión

Las probetas cilíndricas deben ensayarse de acuerdo con la norma ASTM C39 (2008) con las edades especificadas dentro de los 7, 14 y 28 días.

En los días especificados se toma un número representativo de cilindros de hormigón de la cámara de humedad; se deja reposar los cilindros alrededor de una hora, para que el agua contenida dentro escurra y así poder medir y pesar los especímenes.

Se verifica que las caras del cilindro estén planas o con un rango máximo de variación de 0.05mm, y se prosigue a colocar los cilindros en la máquina de compresión colocando en sus caras neopreno, con fin de uniformizar la carga.



Figura 3.2.4. Ensayos de compresión

5.3. Ensayos de las muestras

5.3.1. Determinación de la Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión es la capacidad que tiene el hormigón a los 28 días para soportar una carga determinada y que es utilizada por los diseñadores para el cálculo de estructuras. Es la característica mecánica más importante del hormigón.

Para estas

5.3.2. Dosificación

Para este proceso se tomó en consideración el paso de la mezcla de un metro cúbico a litros en un total de dos pruebas, la primera para 20 lt y la segunda a 10 lt. En lo que respecta a la información de las pruebas se tiene:

Tabla 3. Identificación de prueba N°1 y N°2

PRUEBA N°: 1				
DISEÑO:	600	Kg/cm ²	58,8235	MPA
PRUEBA N°: 2				
DISEÑO:	450	Kg/cm ²	44,1176	MPA

Tabla 4. Dosificación para 20 litros

	TIPO	Dsss	Est. Nat.	(20) litros	Dis. Corregido
CEMENTO	Holcim HE Port	537,00	537,00	10,74	537
PIEDRA #	Piedra 67	865,00	853,40	17,07	865
ARENA (2)	San Antonio Castell	674,00	653,97	13,08	674
AGUA	Potable	205,00	236,63	4,73	205

Tabla 5. *Dosificación para 10 litros*

	TIPO	Dsss	Est. Nat.	(10) litros	Dis. Corregido
CEMENTO	Holcim HE Port	537,00	537,00	5,37	537
PIEDRA #	Piedra 67	865,00	849,75	8,50	865
ARENA (2)	San Antonio Castell	674,00	654,71	6,55	674
AGUA	Potable	205,00	239,54	2,40	205

6. Capítulo VI: ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. Presentación de resultados

6.1.1. Ensayos de compresión y análisis

Este ensayo se llevó a cabo en un total de 12 cilindros con un análisis de comportamiento físico en el periodo correspondiente a edades de 3, 7 y 28 días necesarios para poder analizar la relación tiempo versus resistencia del hormigón.

Tabla 6. Comprensión de muestras de 450 Kg/cm²

Fecha de Moldeo	Fecha de Ensayo	Edad días	Resistencia estimada kg/cm ²	Diámetro mm	Carga Máxima kN	Resistencia obtenida MPa	Promedio MPa	Promedio kg/cm ²	% respecto a f'c
26-oct-22	29-oct-22	3	534	101,61	269,3	33,2	34,2	348,8	65%
				100,87	278,8	34,9			
				101,15	277,0	34,5			
27-oct-22	3-nov-22	7	534	100,55	372,9	47,0	44,2	450,5	84%
				102,11	350,4	42,8			
				101,93	348,7	42,7			
27-oct-22	24-nov-22	28	534	101,03	432,1	53,9	53,5	545,9	102%
				101,35	429,6	53,3			
				100,93	427,1	53,4			

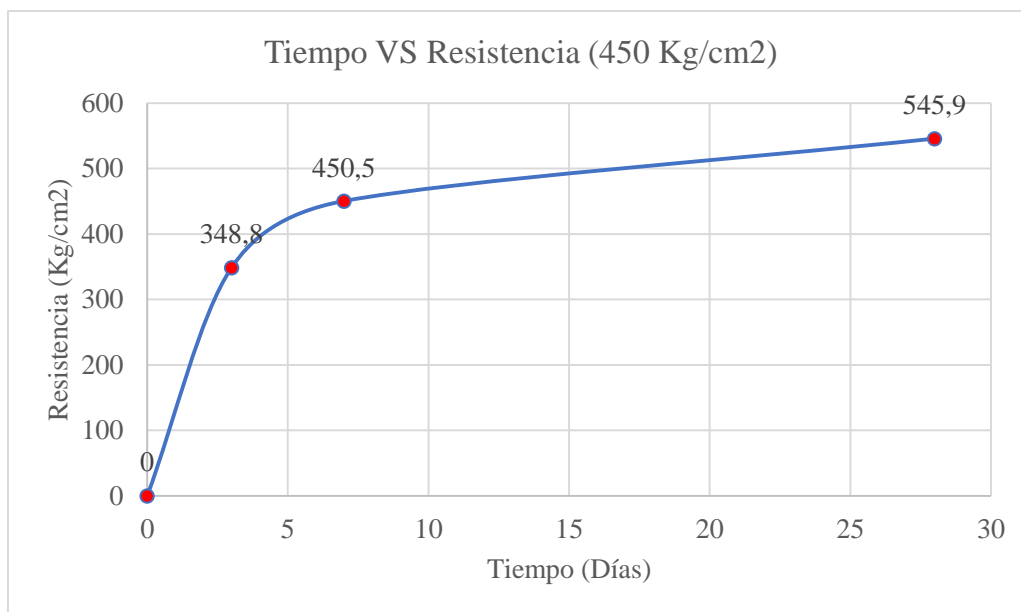


Figura 6.1.1.1. Curvatura T-R para muestra de 450 kg/cm²

Como es apreciable en la Figura 6.1.1.1., la mayor resistencia promedio alcanzada fue de 545,9 kilogramos por cada centímetro cuadrado a los 28 días de secado, siendo esta la mejor resistencia característica del hormigón con 102% respecto al $f'c$ estimado.

Tabla 7. *Comprensión de muestras de 500 Kg/cm²*

Fecha de		Edad	Resistencia	Diámetro	Carga	Resistencia	Promedio		% respecto
Moldeo	Ensayo	días	estimada		Máxima	obtenida	MPa	kg/cm2	a $f'c$
			kg/cm2	mm	kN	MPa			
31-oct-22	3-nov-22	3	584	102,36	266,1	32,3	33,9	345,8	59%
				101,35	271,1	33,6			
				104,09	304,4	35,8			
31-oct-22	7-nov-22	7	584	104,0	400,8	47,2	47,2	481,2	82%
				104,1	410,4	48,2			
				103,9	390,5	46,1			
2-nov-22	30-nov-22	28	584	103,98	498,4	58,7	58,8	599,9	103%
				101,44	482,9	59,8			
				103,81	490,8	58,0			

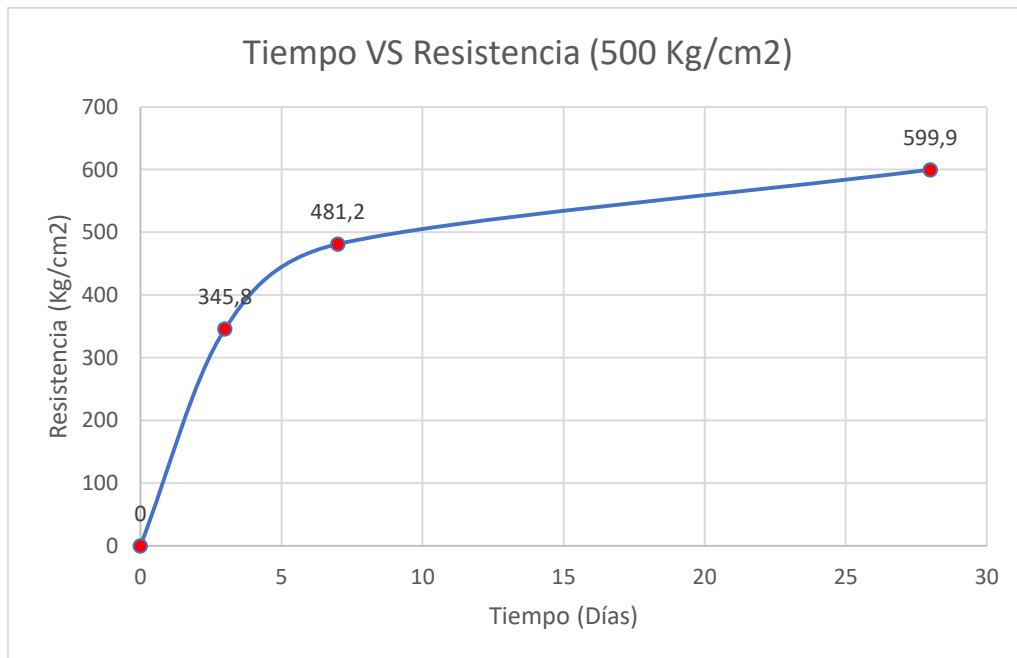


Figura 6.1.1.2. Curvatura T-R para muestra de 500 kg/cm²

En lo que respecta a la muestra de 500 kilogramos por cada centímetro cuadrado, esta alcanza su mayor dureza a la edad de 28 días, con un total de 599,9 Kg/cm². Esta muestra que se

alcanzó una resistencia superior a la mostrada en la Tabla 5.3.2.1. y Figura 6.1.1.1. La resistencia característica alcanzada es de 103% respecto al f'_c estimado, a los 28 días de preparación de la probeta.

Tabla 8. *Comprensión de muestras de 550 Kg/cm²*

Fecha de		Edad	Resistencia	Diámetro	Carga	Resistencia	Promedio		% respecto
Moldeo	Ensayo	días	kg/cm2	mm	kN	MPa	MPa	kg/cm2	a f'_c
9-nov-22	12-nov-22	3	634	103,64	364,4	43,2	43,2	441,0	70%
				104,10	367,0	43,1			
				104,51	372,0	43,4			
10-nov-22	17-nov-22	7	634	102,20	451,6	55,1	55,8	568,8	90%
				101,52	455,7	56,3			
				101,02	448,2	55,9			
11-nov-22	9-dic-22	28	634	101,03	492,7	61,5	62,4	636,2	100%
				101,27	501,8	62,3			
				104,21	540,4	63,4			



Figura 3.1.1.3. Curvatura T-R para muestra de 550 Kg/cm²

Gracias a la Figura 3.1.1.3 es posible interpretar como la muestra de 550 kg/cm² alcanza su resistencia esperada a los 28 días llegando a una resistencia promedio máxima de 636,2

kilogramos por cada centímetro cuadrado a los 28 días de edad con una resistencia característica del 100% respecto al $f'c$ estimado.

Tabla 9. *Comprensión de muestras de 600 Kg/cm²*

Fecha de		Edad	Resistencia	Diámetro	Carga	Resistencia	Promedio		% respecto
Moldeo	Ensayo	días	kg/cm ²		Máxima	obtenida	MPa	kg/cm ²	a $f'c$
15-nov-22	18-nov-22	3	684	103,43	358,0	42,6	43,3	441,8	65%
				101,01	350,1	43,7			
				101,74	354,9	43,7			
17-nov-22	24-nov-22	7	684	101,61	482,0	59,4	58,6	597,2	87%
				101,53	476,6	58,9			
				101,24	461,5	57,3			
16-nov-22	14-dic-22	28	684	101,33	544,0	67,5	68,6	699,7	102%
				101,24	555,8	69,0			
				101,51	560,7	69,3			

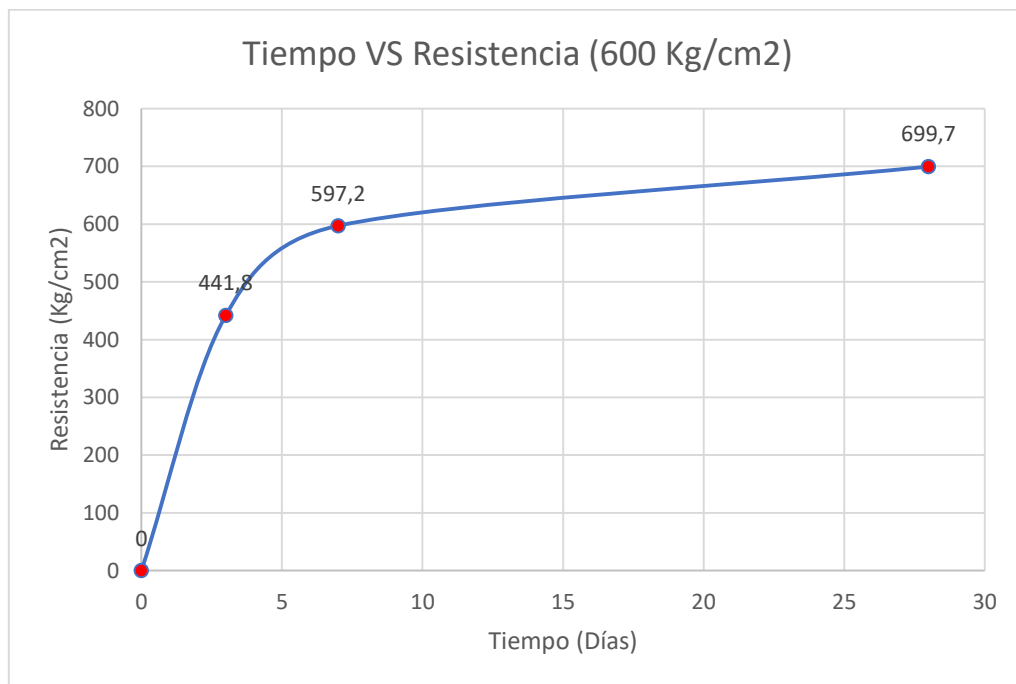


Figura 6.1.1.4. Curvatura T-R para muestra de 600 kg/cm²

Finalmente, para la muestra de 600 kg/cm² se alcanza la resistencia inicial a los 7 días de edad tras la fabricación de la probeta con una resistencia característica del 87%. La

resistencia máxima es alcanzada a los 28 días de preparación con un valor final de 699,7 kg/cm² con un porcentaje característico de 102% respecto al f'c estimado.

En base a todos los resultados analizados de los ensayos de compresión se puede interpretar que la muestra con mejor porcentaje de resistencia característica a los 7 días de edad es la muestra de 550 kg/cm², ya que esta alcanzo el 90% de la resistencia esperada a dicha edad. Mientras que el mejor porcentaje respecto al f'c estimado a la edad de 28 días lo obtuvo la muestra de los 500 kg/cm², la cual alcanzo el 103% de la resistencia estimada.

6.1.2. Ensayos a la tracción por método brasileño

Para este ensayo se tomó en consideración un total de 3 cilindros con una edad de 28 días para el análisis de resistencia a la tracción.

El valor de resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% del valor de su resistencia a compresión.

Tabla 10. Ensayo brasileño a la muestra de 450 Kg/cm²

Fecha de Moldeo	Fecha de Ensayo	Edad días	Resistencia estimada kg/cm ²	Diámetro mm	Alto mm	Carga Máxima kN	Resistencia obtenida MPa	Promedio MPa	Promedio kg/cm ²	% respecto a f'c
				103,86	203,40	133,1	6,3			
27-oct-22	24-nov-22	28	534	101,29	203,30	129,3	6,3	6,3	64,2	12%
				100,95	204,03	129,7	6,3			

Tabla 11. Ensayo brasileño a la muestra de 500 Kg/cm²

Fecha de Moldeo	Fecha de Ensayo	Edad días	Resistencia estimada kg/cm ²	Diámetro mm	Alto mm	Carga Máxima kN	Resistencia obtenida MPa	Promedio MPa	Promedio kg/cm ²	% respecto a f'c
				101,71	203,83	143,9	6,9			
2-nov-22	30-nov-22	28	584	100,78	203,38	137,0	6,7	6,9	70,1	12%
				103,32	201,20	145,3	7,0			

Tabla 12. *Ensayo brasileño a la muestra de 550 Kg/cm²*

Fecha de		Edad	Resistencia estimada	Diámetro	Alto	Carga Máxima	Resistencia obtenida	Promedio	% respecto	
Moldeo	Ensayo	días	kg/cm ²	mm	Mm	kN	MPa	MPa	kg/cm ²	a f'c
				101,80	202,93	145,3	7,0			
11-nov-22	9-dic-22	28	634	103,79	200,90	157,9	7,6	7,4	75,8	12%
				101,76	202,18	157,9	7,7			

Tabla 13. *Ensayo brasileño a la muestra de 600 Kg/cm²*

Fecha de		Edad	Resistencia estimada	Diámetro	Alto	Carga Máxima	Resistencia obtenida	Promedio	% respecto	
Moldeo	Ensayo	días	kg/cm ²	mm	mm	kN	MPa	MPa	kg/cm ²	a f'c
				101,89	204,28	157,9	7,6			
16-nov-22	14-dic-22	28	684	101,25	205,28	168,9	8,1	8,0	81,7	12%
				101,34	204,88	172,4	8,3			

Como es de esperarse, el cilindro que presento mejores resultados a los ensayos de tracción es la muestra de 600 kg/cm² con un valor promedio de 81,7 kg/cm² y una resistencia característica del 12%. Valores similares se demostraron en los diferentes cilindros con respecto a su %f'c.

6.1.4. Ensayos de Flexo-tracción

Para este ensayo se utilizaron 5 vigas transcurrido un tiempo de curado de 28 días, los resultados de cada probeta se presentan a continuación.

Tabla 14. *Módulo de rotura de muestras de 450 Kg/cm²*

Fecha de		Edad	Tipo de	Diámetro	Largo	Carga Máxima	Resistencia obtenida	Resistencia obtenida	Promedio	% respecto	
Moldeo	Ensayo	días	hormigón	mm	mm	kN	MPa	Kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	a f'c
26-oct-22	23-nov-22			150,00	534,0	41,4	6,6	66,8			
				150,00	535,0	42,8	6,8	69,2			
27-oct-22	24-nov-22	28	534	150,00	534,0	40,7	6,4	65,6	6,5	66,7	12%
				150,00	535,0	41,3	6,5	66,8			
28-oct-22	25-nov-22			150,00	534,0	40,2	6,4	64,9			

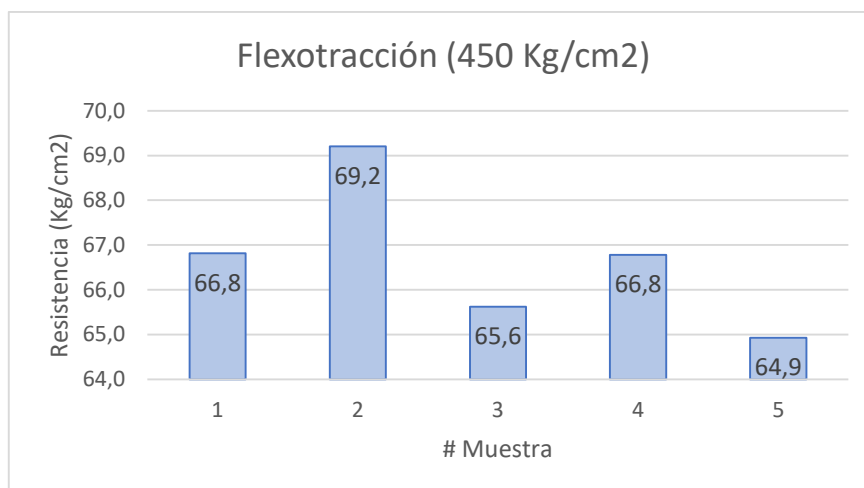


Figura 4. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 450 Kg/cm²

Tabla 15. Módulo de rotura de muestras de 500 Kg/cm²

Fecha de Moldeo	Fecha de Ensayo	Edad días	Tipo de hormigón	Diámetro mm	Largo mm	Carga Máxima kN	Resistencia obtenida MPa	Resistencia obtenida Kg/cm ²	Promedio MPa	Promedio kg/cm ²	% respecto a f'c
31-oct-22	28-nov-22			150,00	534,00	44,7	7,1	72,1			
				150,00	534,00	43,9	7,0	70,9			
2-nov-22	30-nov-22	28	584	150,00	535,00	46,9	7,4	75,8	7,1	72,9	12%
				150,00	534,00	45,3	7,2	73,1			
				150,00	535,00	44,8	7,1	72,4			

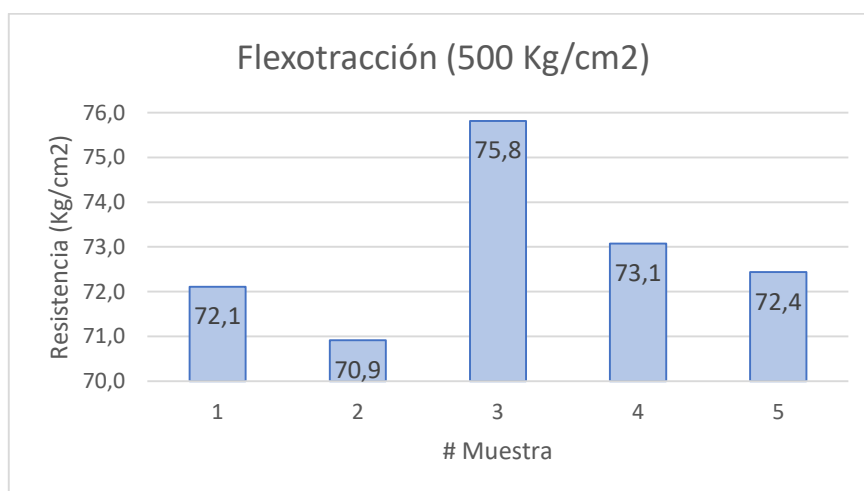


Figura 5. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 500 Kg/cm²

Tabla 16. Módulo de rotura de muestras de 550 Kg/cm²

Fecha de		Edad	Tipo de	Diámetro	Largo	Carga	Resistencia	Resistencia	Promedio		%
Moldeo	Ensayo	días	hormigón	mm	mm	Máxima	obtenida	obtenida	MPa	kg/cm2	respecto
				mm	mm	kN	MPa	Kg/cm2			a f'c
9-nov-22	7-dic-22			150,00	535,00	49,3	7,8	79,7			
10-nov-22	8-dic-22			150,00	534,00	48,1	7,6	77,5			
		28	634	150,00	534,00	49,1	7,8	79,3	7,7	78,2	12%
11-nov-22	9-dic-22			150,00	535,00	48,0	7,6	77,5			
				150,00	534,00	47,8	7,6	77,1			

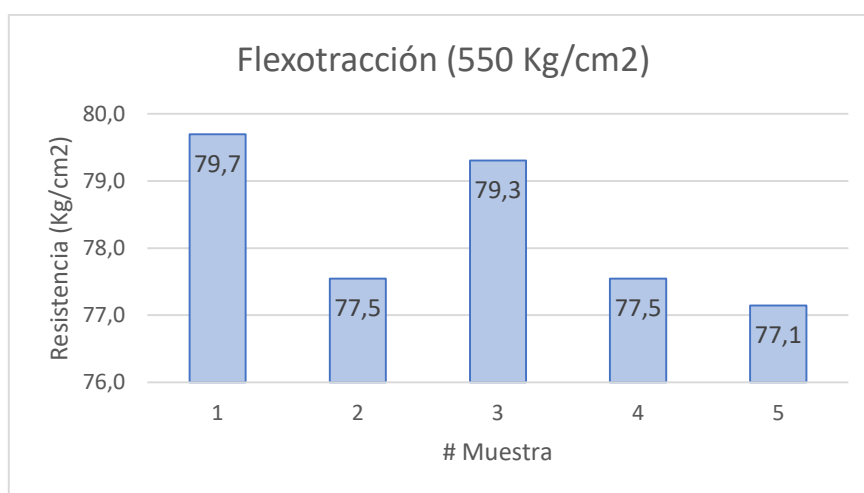


Figura 6. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 550 Kg/cm²

Tabla 17. Módulo de rotura de muestras de 600 Kg/cm²

Fecha de		Edad	Tipo de	Diámetro	Largo	Carga	Resistencia	Resistencia	Promedio		%
Moldeo	Ensayo	días	hormigón	mm	mm	Máxima	obtenida	obtenida	MPa	kg/cm2	respecto
				mm	mm	kN	MPa	Kg/cm2			a f'c
15-nov-22	13-dic-22			150,00	534,00	53,1	8,4	85,6			
16-nov-22	14-dic-22	28	684	150,00	535,00	50,8	8,1	82,1	8,2	83,5	12%
				150,00	534,00	51,9	8,2	83,8			
				150,00	535,00	50,3	8,0	81,3			
17-nov-22	15-dic-22			150,00	535,00	52,4	8,3	84,8			

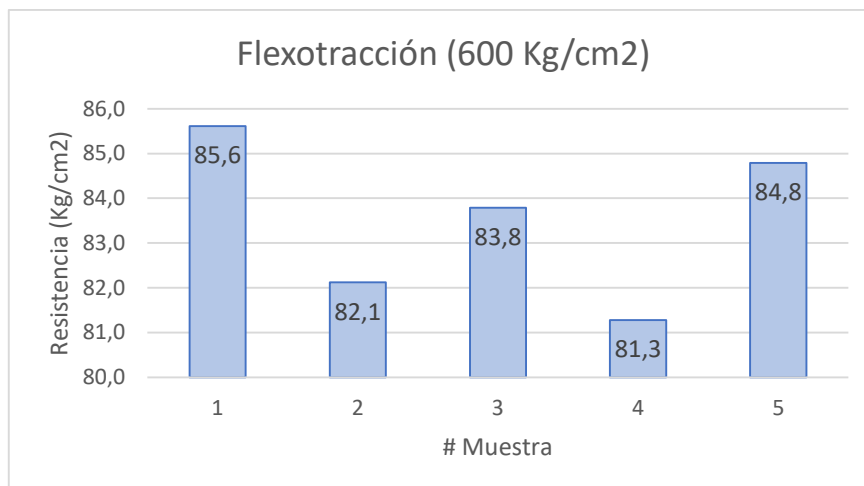


Figura 7. Gráfica de Flexo-tracción para muestra de 600 Kg/cm²

Para los ensayos de flexo-tracción se observan resultados similares a los ensayos brasileños hechos a la tracción, es decir, cada una de las muestras tuvieron una fuerza característica del 12% a 28 días de su fabricación. Como era de esperar las muestras de las vigas de 600 kg/cm² resultaron tener la mejor resistencia al tener un valor promedio de 83,5 kg/cm².

6.1.5. Ensayos de Módulo de Elasticidad

Para este ensayo se utilizaron 4 cilindros de cada dosificación tras transcurrir un tiempo de curado de 28 días, se utilizó un cilindro de testigo para calibrar el deformimetro y los otros 3 especímenes se utilizaron para la obtención de datos que se presentan en ANEXOS.



Figura 6.1.5. Cilindros para Módulo de Elasticidad

7. Capítulo VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Los aspectos teórico más relevantes de los hormigones de alta resistencia empiezan con una resistencia a la compresión mayor a 50 MPa, debido a que este es utilizado en estructuras que requieren gran resistencia, tales como; puentes, edificios, presas, entre otros.
- Las propiedades del cemento HOLCIM HE incluyen aspectos como; un tiempo de fraguado de no más ni menos de 150 minutos y un 3% de contenido de aire del mortero en volumen. Además, entre la resistencia a la compresión mínima que se obtiene con este cemento a los 28 días de edad es de 40 MPa, y con una expansión en barra de un máximo de 0,001%.
- El diseño de mezclas de hormigones de resistencia alta utilizando los agregados de las minas mencionadas tuvo medidas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para sus respectivas pruebas en cilindros. Además, el curado de estos se realiza a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Los resultados obtenidos con diferentes dosificaciones para hormigones de resistencias altas demuestran mejores resultados en la muestra de 600 kg/cm^2 , misma que después de 28 días de solidificación fue capaz de soportar $699,7 \text{ kg/cm}^2$ en compresión, $81,7 \text{ kg/cm}^2$ en tracción y $83,5 \text{ kg/cm}^2$ en ensayos de flexo-tracción.

7.2. Recomendaciones

- Es necesario tomar en consideración características de hormigones de alta resistencia para construcciones y estructuras, aun cuando estas no sean tan grandes, ya que de esta manera es posible asegurar que no se comprometa la integridad estructural.
- Se recomienda usar el cemento HOLCIM HE en la construcción, ya que este junto con otros aditivos, es capaz de proporcionar mejores características de resistencia a cada estructura en donde esta es usada.
- Respetar parámetros colocados en cada una de las normas para las debidas pruebas, ya que estas garantizan la vialidad y validez de sus resultados para divulgación científica y posterior investigación.

8. Referencias

- Aidarov, S., Mena, F., & Fuente, A. (2022). Caracterización de las propiedades en estado fresco y endurecido de hormigones autocompactantes reforzados con altas cuantías de macrofibras metálicas. *Congreso Trienal de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). "Hormigón y Acero: volumen 73, especial VIII Congreso ACHE, Junio 2022"*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/371045>
- Alvarado, S., Vélez, A., Ruiz, W., Ortiz, E., & Jarre, C. (2019). Estudio de la resistencia a compresión del hormigón utilizando el vidrio finamente molido en reemplazo parcial del cemento. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, 4(2), 1-7. doi:<https://doi.org/10.33936/riemat.v4i2.2187>
- ASTM. (2005). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2008). *C 143 - 08. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. American Society for Testing and Materials.
- Bacuilima, A., & Guillén, W. (2019). *Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión*. Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil, Cuenca, Ecuador. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32377>
- Briones, E. V., & Mora, P. S. (2022). *Caracterización de materiales y diseño de hormigones comerciales bombeados para la empresa Hormi Center a partir de la adaptación del método de diseño de mezclas de concreto según ACI 211.1 y Fuller, con el tipo de cemento HE de la casa cementera HOLCIM*. Universidad de Cuenca.
- Cedeño, H., Chávez, J., Macías, L., & Ortiz, E. (2022). Combinación de mezclas de agregados gruesos y finos pertenecientes a la Cantera Uruzca para diferentes resistencias de hormigón. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 5(9), 23-38. doi:<https://doi.org/10.46296/ig.v5i9edespfeb.0055>
- Chango, T., & Tulcán, A. (2018). *Correlación del Módulo de Rotura del hormigón simple en vigas elaboradas con agregados pétreos naturales y agregados reciclados*. Universidad Central del Ecuador., Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y

- Matemática. Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/17109>
- Domingo, M. (2023). *La mano robótica en encofrados de hormigón armado*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Grado en Fundamentos de la Arquitectura, Madrid, España. Obtenido de <https://oa.upm.es/72594/>
- Egoavil, G. (2022). *Análisis Comparativo de las Propiedades Físico y Mecánicas del Hormigón Reforzado con Fibra de Acero y Polipropileno*. Universidad Peruana Los Andes, Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Huancayo, Perú . Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12848/3809>
- Holcim. (2015). *Holcim Premium. Cemento hidráulico Tipo HE de alta resistencia inicial*. Holcim Ecuador S.A.
- Huamán, M., Rodríguez, T., & Díaz, D. (2022). Comparación de propiedades físicas y mecánicas del hormigón tradicional y el hormigón con fibras metálicas recicladas. *Gaceta Técnica*, 23(2), 23-37. doi:<https://doi.org/10.51372/gacetatecnica232.3>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón*. INEN.
- León, L., & Rodríguez, C. (2022). Factores que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón. Estado del arte. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 16(3), 1-12. Retrieved from <https://www.redalyc.org/journal/1939/193972950003/>
- López, M., & Ontaneda, J. (2021). *Diseño de mezclas de hormigón aplicando redes neuronales artificiales para diferentes agregados del cantón Quito, provincia de Pichincha*. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/24621>
- Lozano, A., & Tabango, M. (2019). *Correlación de las propiedades físico-mecánicas del hormigón de alta resistencia fabricado con y sin adiciones de residuos industriales*. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática. Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18077>

- Mansilla, P., Corallo, P., Fornasier, G., Gebert, F., Martínez, L., Mazzola, M., . . . Ríos, M. (2022). Diseño, producción y colocación del hormigón de mayor resistencia en Argentina. *Revista Hormigón*(61), 52–71. Retrieved from <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/frgeywwcc>
- Mattio, M. (2014). *La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón - Parte I*. Universidad Nacional de Córdoba (Argentina). Retrieved from <http://hdl.handle.net/11086/1576>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2013). Norma Ecuatoriana Vial, NEVI-12. Quito, Ecuador.
- Montero, A., & Román, A. (2022). *Caracterización del uso de estopas de coco como componente en la dosificación de hormigones*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil , Quito, Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/21093>
- Moya, J., & Cando, L. (2019). Análisis de las prioridades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con fibras de acero reciclado. *INGENIO, Revista de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática*, 1(2), 5–14. Retrieved from <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/1623>
- Muñoz, S., Cabrera, A., Delgado, C., & Renilla, P. (2022). Comportamiento físico-mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria. *Revista UIS ingenierías*, 21(1), 57-72. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022005>
- Ojha, P., Singh, P., Singh, B., Singh, A., Sagar, A., & Yadav, R. (2022). Características estadísticas de la resistencia a la compresión del hormigón de resistencia normal y alta y del hormigón fabricado con árido reciclado. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 3(3), 379-290. doi:<http://dx.doi.org/10.7764/RIC.00041.21>
- Organización Internacional de Normalización ISO. (2018). *Norma ISO 5667-3:2018. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/72370.html>
- Parrales, E., & Quirumbay, M. (2022). *Diseño de mezcla de hormigón utilizando Metacaolin para obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 Kg/cm²*. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Carrera de

Ingeniería Civil, La Libertad, Ecuador. Retrieved from <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8441>

Quispe, F., & Verástegui, E. (2019). *Propiedades físicas - mecánicas de bloques de hormigón elaborado con agregado grueso reciclado de residuos de construcción en la ciudad de Abancay*. Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería. Escuela profesional de ingeniería civil, Lima, Perú. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2797>

Ramos, L., & Sueldo, M. (2021). *Influencia del Comportamiento Hidráulico del Agua Tratada Mediante Biodigestores en las Propiedades Físico-Mecánicas del Concreto, Huantaro – Huancavelica, 2020*. Universidad Peruana Los Andes, Facultad de Ingeniería. Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Huancayo, Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/2939>

Santamaría, J., Adame, B., & Bermeo, C. (2021). Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen. *Novasinerгия*, 4(1), 91–101. doi:<https://doi.org/10.37135/ns.01.07.05>

Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). *NTE INEN 151. Cemento hidráulico. Definición de términos*. Quito, Ecuador.

Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). *NTE INEN 151. Cemento hidráulico. Definición de términos. Tercera Revisión*. Quito, Ecuador.

Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). NTE INEN 696. Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. Quito, Ecuador.

Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). NTE INEN 855. Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón. Quito, Ecuador.

Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). NTE INEN 856. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad Específica) y absorción del árido fino. Quito, Ecuador.

Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2010). NTE INEN 857. Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (Gravedad Específica) y absorción del árido fino. Quito, Ecuador.

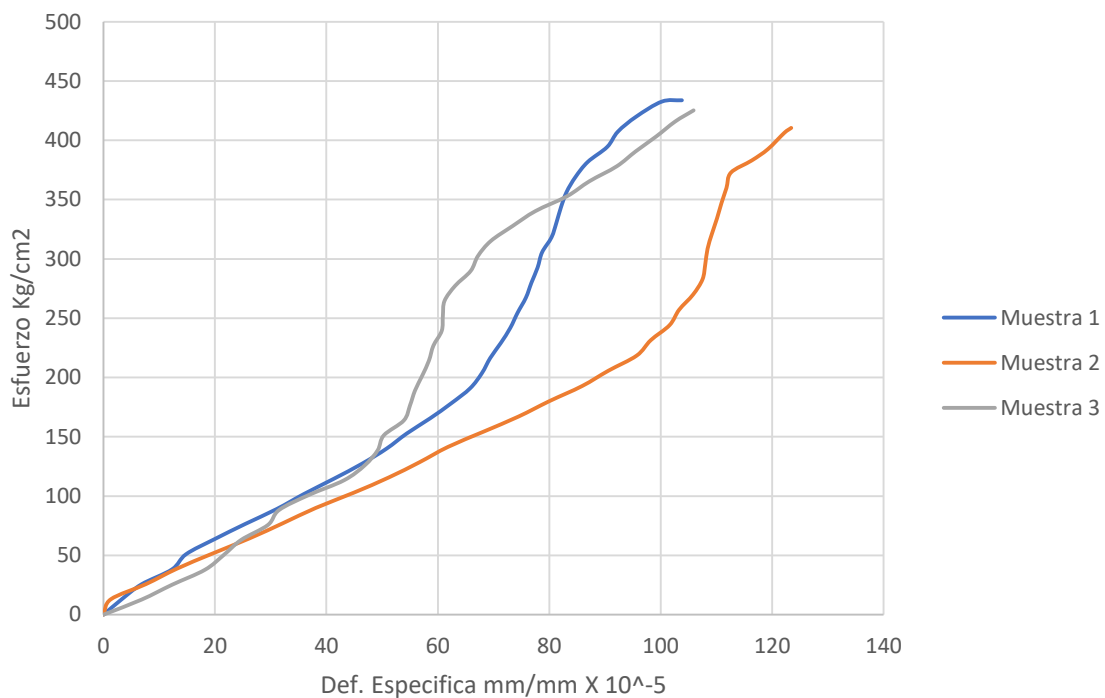
- Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2011). NTE INEN 860. Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles. Quito, Ecuador.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2015). *NTE INEN 1762: Hormigones. Definición y terminología*. Quito, Ecuador.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2015). *NTE INEN 1855-1. Hormigones. Hormigón premezclado. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2015). *NTE INEN 1855-2. Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN. (2020). *NTE INEN 1108 Agua para consumo humano. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- Vega, S., & Medina, C. (2022). *Características mecánicas de hormigones reforzados con fibras de polipropileno en función de la adición de diferentes porcentajes de fibra*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil , Quito, Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.puce.edu.ec:80/handle/22000/21092>

ANEXOS

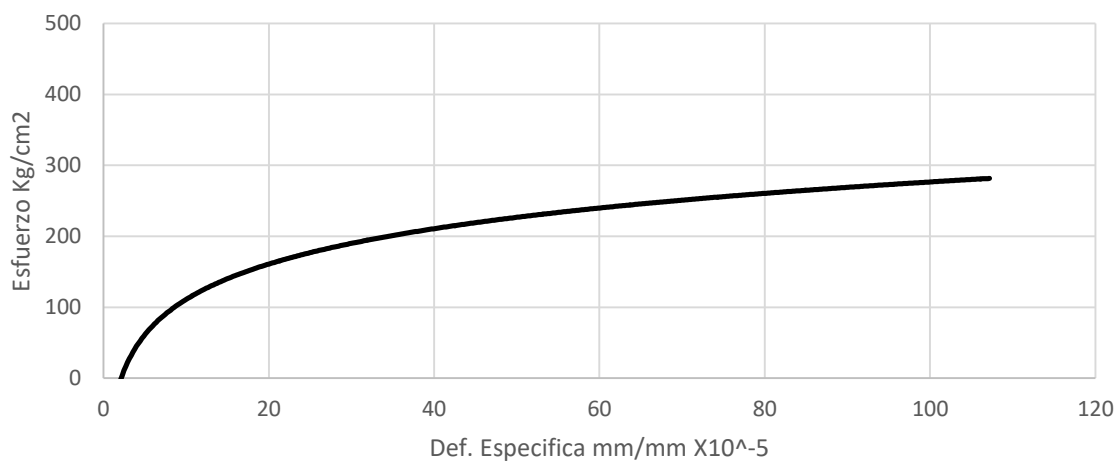
Anexo 1. Módulo Elástico de muestras de 450 Kg/cm²

Muestra 1				Muestra 2				Muestra 3			
Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12,7	9,5	3,2	10	12,9	3,8	1,3	10	12,6	20,3	6,8
20	25,5	20,32	6,8	20	25,7	22,86	7,6	20	25,2	36,83	12,3
30	38,2	36,83	12,3	30	38,6	39,37	13,1	30	37,8	54,61	18,2
40	50,9	44,45	14,8	40	51,4	58,42	19,5	40	50,4	73,66	21,6
50	63,6	59,69	19,9	50	64,3	78,74	26,2	50	63	91,44	24,7
60	76,4	76,2	25,4	60	77,1	96,52	32,2	60	75,6	97,79	29,5
70	89,1	93,35	31,1	70	90	114,3	38,1	70	88,2	127	31,5
80	101,8	107,95	36	80	102,8	134,62	44,9	80	100,8	134,62	36,8
90	114,5	123,83	41,3	90	115,7	153,67	51,2	90	113,4	142,24	43,2
100	127,3	139,07	46,4	100	128,5	170,18	56,7	100	126	151,13	46,9
110	140	152,4	50,8	110	141,4	185,42	61,8	110	138,6	156,21	49,2
120	152,7	163,2	54,4	120	154,3	204,47	68,2	120	151,2	160,02	50,3
130	165,5	175,9	58,6	130	167,1	223,52	74,5	130	163,8	162,56	53,9
140	178,2	187,33	62,4	140	180	240,03	80	140	176,4	165,1	55
150	190,9	197,49	65,8	150	192,8	257,81	85,9	150	189	167,64	55,9
160	203,6	203,84	67,9	160	205,7	271,78	90,6	160	201,6	171,45	57,2
170	216,4	208,28	69,4	170	218,5	287,02	95,7	170	214,2	175,26	58,4
180	229,1	214	71,3	180	231,4	294,64	98,2	180	226,8	180,34	59,2
190	241,8	219,08	73	190	244,2	304,8	101,6	190	239,4	181,61	60,7
200	254,5	222,89	74,3	200	257,1	309,88	103,3	200	252	182,88	60,9
210	267,3	227,33	75,8	210	269,9	317,5	105,8	210	264,6	184,15	61,2
220	280	230,51	76,8	220	282,8	322,58	107,5	220	277,3	185,42	63,1
230	292,7	233,68	77,9	230	295,7	323,85	108	230	289,9	185,42	65,9
240	305,5	236,22	78,7	240	308,5	325,12	108,4	240	302,5	185,42	67,2
250	318,2	241,3	80,4	250	321,4	327,66	109,2	250	315,1	224,26	69,5
260	330,9	243,84	81,3	260	334,2	330,2	110,1	260	327,7	344,17	73,4
270	343,6	246,38	82,1	270	347,1	332,74	110,9	270	340,3	344,17	77,5
280	356,4	248,92	83,1	280	359,9	335,28	111,8	280	352,9	345,44	83,2
290	369,1	251,46	84,7	290	372,8	337,82	112,6	290	365,5	345,44	87,2
300	381,8	254	86,9	300	383,0	348,87	116,3	300	378,1	345,44	92,1
310	394,5	256,54	90,4	310	392,6	357,59	119,2	310	390,7	345,44	95,5
320	407,3	264,16	92,3	320	406,4	370,20	122,2	320	403,3	346,71	99,2
330	420	266,7	95,6	323,21	410,5	373,90	123,4	330	415,9	347,98	102,6
340	432,7	269,24	100,2					337,48	425,3	349,25	105,9

Esfuerzo-Deformación Muestras 450 Kg/cm²



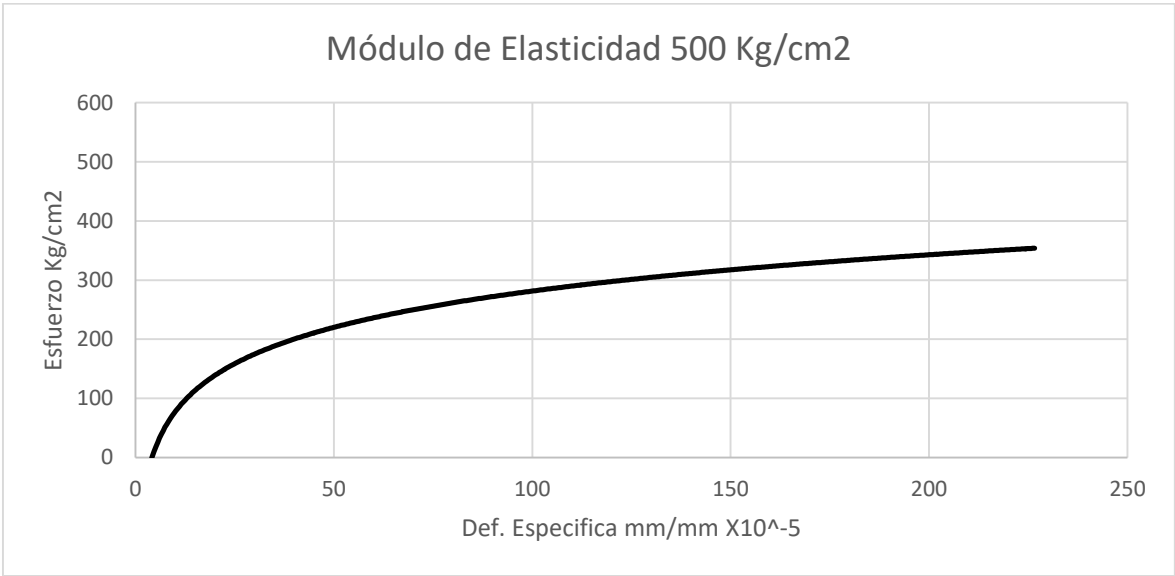
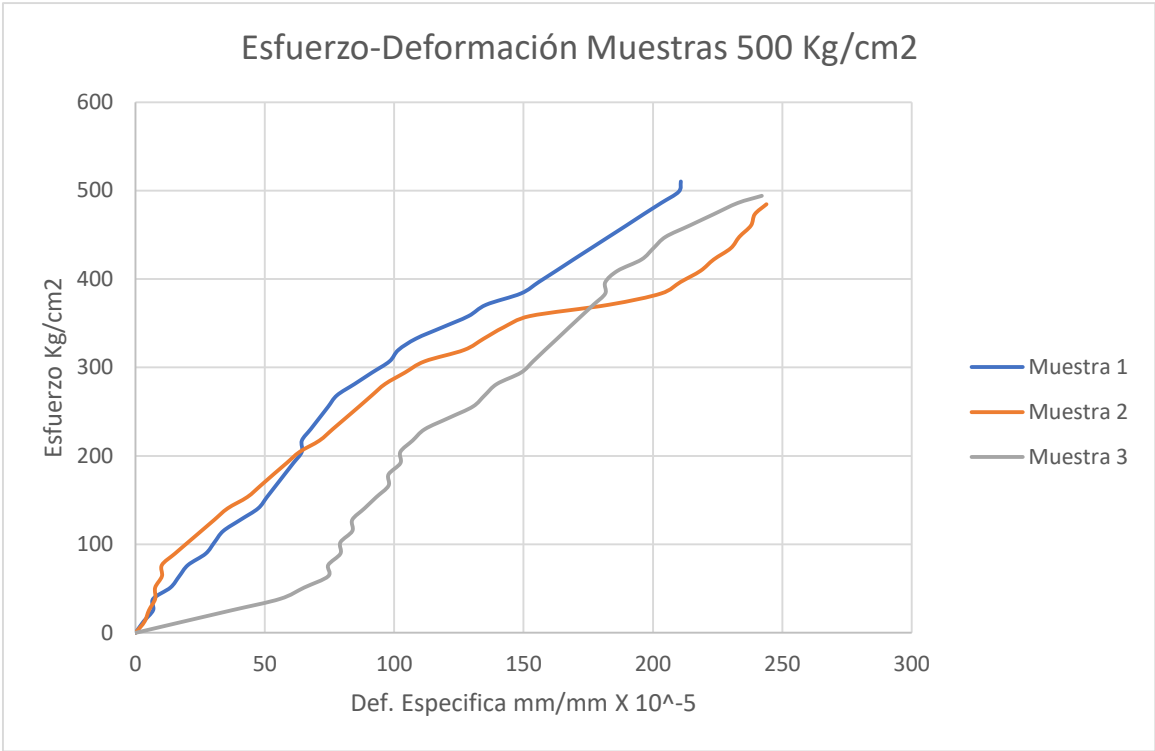
Módulo de Elasticidad 450 Kg/cm²



Anexo 2. Módulo Elástico de muestras de 500 Kg/cm²

Muestra 1				Muestra 2				Muestra 3			
Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12,8	10,21	3,1	10	12,8	10,25	3,5	10	12,8	55,9	18,6
20	25,6	20,32	6,8	20	25,6	17,62	5,2	20	25,6	111,76	37,3
30	38,4	20,32	6,8	30	38,4	22,86	7,6	30	38,4	167,64	55,9
40	51,2	40,64	13,5	40	51,2	22,86	7,6	40	51,2	195,58	65,2
50	64	50,8	16,9	50	64	30,48	10,2	50	64	223,52	74,5
60	76,7	60,96	20,3	60	76,7	30,48	10,2	60	76,7	223,52	74,5
70	89,5	81,28	27,1	70	89,5	45,72	15,2	70	89,5	237,49	79,2
80	102,3	91,44	30,5	80	102,3	60,96	20,3	80	102,3	237,49	79,2
90	115,1	101,6	33,9	90	115,1	76,2	25,4	90	115,1	251,46	83,8
100	127,9	121,92	40,6	100	127,9	91,44	30,5	100	127,9	251,46	83,8
110	140,7	142,24	47,4	110	140,7	106,68	35,6	110	140,7	265,43	88,5
120	153,5	152,4	50,8	120	153,5	129,54	43,2	120	153,5	279,4	93,1
130	166,3	162,56	54,2	130	166,3	144,78	48,3	130	166,3	293,37	97,8
140	179,1	172,72	57,6	140	179,1	160,02	53,3	140	179,1	293,37	97,8
150	191,9	182,88	61	150	191,9	175,26	58,4	150	191,9	307,34	102,4
160	204,7	193,04	64,3	160	204,7	190,5	63,5	160	204,7	307,34	102,4
170	217,4	193,04	64,3	170	217,4	213,36	71,1	170	217,4	321,31	107,1
180	230,2	203,2	67,7	180	230,2	228,6	76,2	180	230,2	335,28	111,8
190	243	213,36	71,1	190	243	243,84	81,3	190	243	363,22	121,1
200	255,8	223,52	74,5	200	255,8	259,08	86,4	200	255,8	391,16	130,4
210	268,6	233,68	77,9	210	268,6	274,32	91,4	210	268,6	405,13	135
220	281,4	254	84,7	220	281,4	289,56	96,5	220	281,4	419,1	139,7
230	294,2	274,32	91,4	230	294,2	312,42	104,1	230	294,2	447,04	149
240	307	294,64	98,2	240	307	335,28	111,8	240	307	461,01	153,7
250	319,8	304,8	101,6	250	319,8	381	127	250	319,8	474,98	158,3
260	332,6	325,12	108,4	260	332,6	403,86	134,6	260	332,6	488,95	163
270	345,3	355,6	118,5	270	345,3	426,72	142,2	270	345,3	502,92	167,6
280	358,1	386,08	128,7	280	358,1	457,2	152,4	280	358,1	516,89	172,3
290	370,9	406,4	135,5	290	370,9	548,64	182,9	290	370,9	530,86	177
300	383,7	447,04	149	300	383,7	609,6	203,2	300	383,7	544,83	181,6
310	396,5	467,36	155,8	310	396,5	655,32	210,6	310	396,5	544,83	181,6
320	409,3	487,68	162,6	320	409,3	716,28	218,4	320	409,3	558,8	186,3
330	422,1	508	169,3	330	422,1	777,24	223,5	330	422,1	586,74	195,6
340	434,9	528,32	176,1	340	434,9	883,92	230,1	340	434,9	600,71	200,2
350	447,7	548,64	182,9	350	447,7	944,88	233,4	350	447,7	614,68	204,9
360	460,5	568,96	189,7	360	460,5	994,87	237,9	360	460,5	642,62	214,2
370	473,3	589,28	196,4	370	473,3	944,88	239,4	370	473,3	670,56	223,5

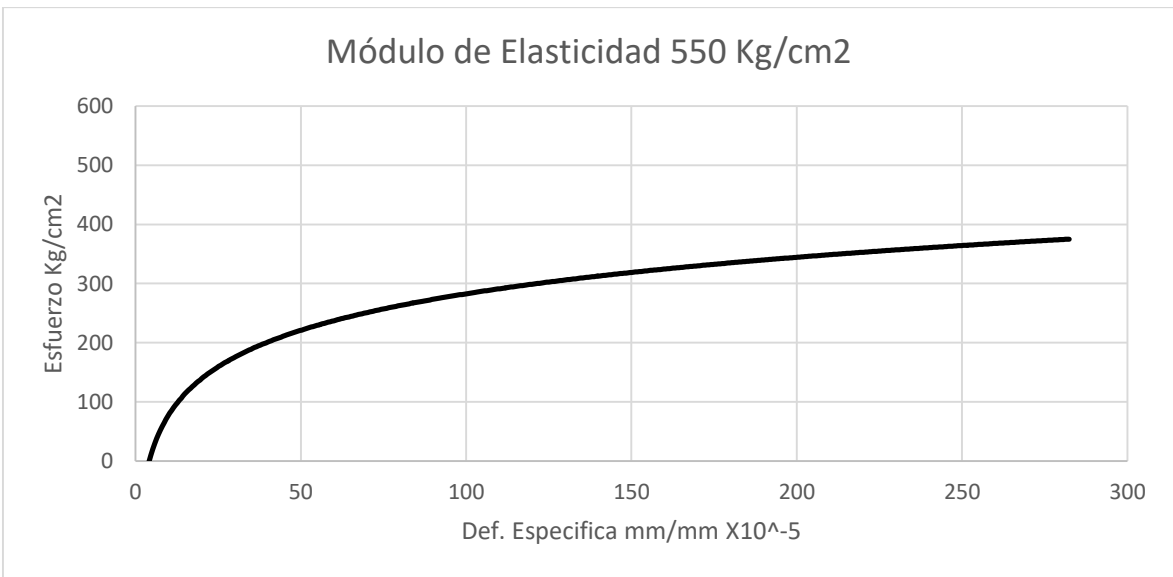
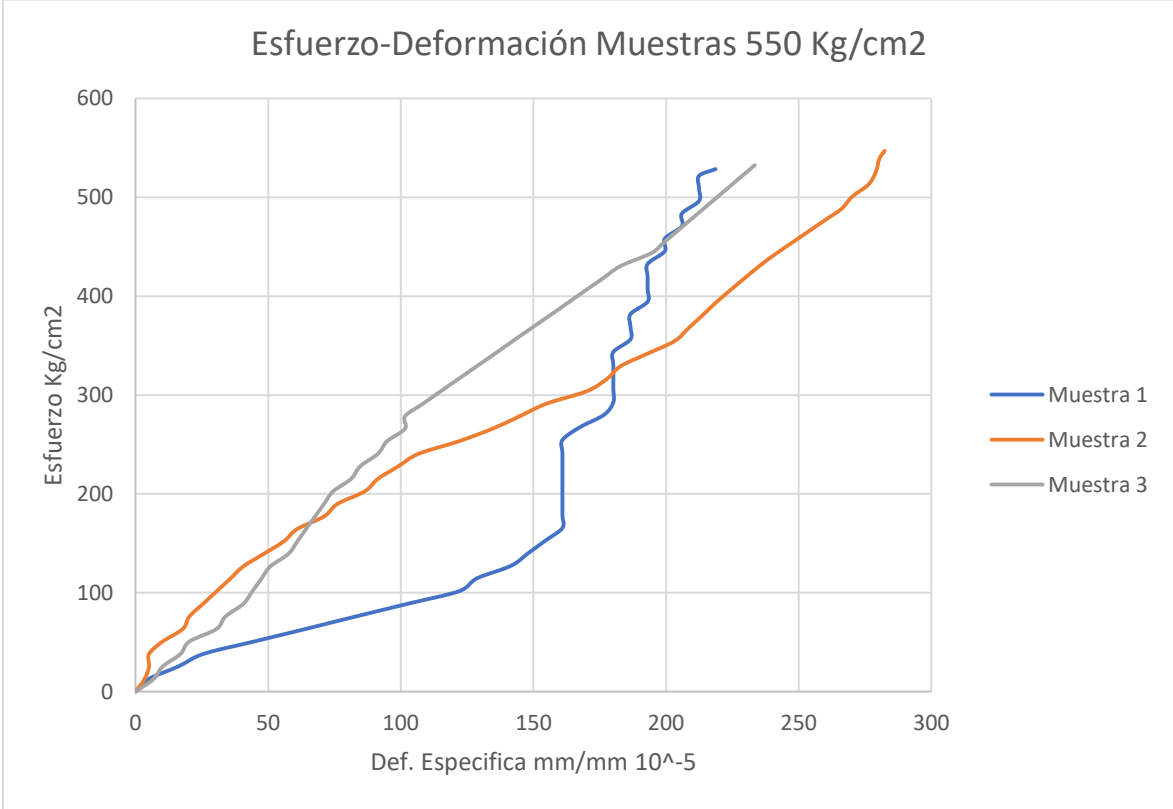
380	486	609,6	203,2	378,91	484,6	994,87	243,9	380	486	698,5	232,8
390	498,8	629,92	210					386,31	494,1	726,44	242,1
398,93	510,3	632,46	210,8								



Anexo 3. Módulo Elástico de muestras de 550 Kg/cm²

Muestra 1				Muestra 2				Muestra 3			
Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	12,7	40,6	4,94	10	12,7	9,59	3,4	10	12,7	20,3	6,8
20	25,5	71,12	16,15	20	25,3	15,24	5,1	20	25,3	30,48	10,2
30	38,2	101,6	25,65	30	38	15,24	5,1	30	38	50,8	16,9
40	50,9	132,08	45,03	40	50,7	30,48	10,2	40	50,7	60,96	20,3
50	63,6	162,56	64,41	50	63,3	53,34	17,8	50	63,3	91,44	30,5
60	76,4	193,04	83,6	60	76	60,96	20,3	60	76	101,6	33,9
70	89,1	203,2	102,98	70	88,7	76,2	25,4	70	88,7	121,92	40,6
80	101,8	223,52	122,17	80	101,3	91,44	30,5	80	101,3	132,08	44
90	114,5	233,68	128,63	90	114	106,68	35,6	90	114	142,24	47,4
100	127,3	243,84	141,55	100	126,6	121,92	40,6	100	126,6	152,4	50,8
110	140	254	148,01	110	139,3	144,78	48,3	110	139,3	172,72	57,6
120	152,7	254	154,47	120	152	167,64	55,9	120	152	182,88	61
130	165,5	254	160,93	130	164,6	182,88	61	130	164,6	193,04	64,3
140	178,2	254	160,93	140	177,3	213,36	71,1	140	177,3	203,2	67,7
150	190,9	254	160,93	150	190	228,6	76,2	150	190	213,36	71,1
160	203,6	254	160,93	160	202,6	259,08	86,4	160	202,6	223,52	74,5
170	216,4	254	160,93	170	215,3	274,32	91,4	170	215,3	243,84	81,3
180	229,1	254	160,93	180	228	297,18	99,1	180	228	254	84,7
190	241,8	264,16	160,93	190	240,6	320,04	106,7	190	240,6	274,32	91,4
200	254,5	284,48	160,93	200	253,3	365,76	121,9	200	253,3	284,48	94,8
210	267,3	284,48	167,39	210	266	403,86	134,6	210	266	304,8	101,6
220	280	284,48	176,59	220	278,6	434,34	144,8	220	278,6	304,8	101,6
230	292,7	284,48	180,12	230	291,3	464,82	154,9	230	291,3	325,12	108,4
240	305,5	284,48	180,12	240	304	510,54	170,2	240	304	345,44	115,1
250	318,2	284,48	180,12	250	316,6	533,4	177,8	250	316,6	365,76	121,9
260	330,9	294,64	180,12	260	329,3	548,64	182,9	260	329,3	386,08	128,7
270	343,6	294,64	180,12	270	341,9	579,12	193	270	341,9	406,4	135,5
280	356,4	294,64	186,58	280	354,6	609,6	203,2	280	354,6	426,72	142,2
290	369,1	304,8	186,58	290	367,3	624,84	208,3	290	367,3	447,04	149
300	381,8	304,8	186,58	300	379,9	640,08	213,4	300	379,9	467,36	155,8
310	394,5	304,8	193,04	310	392,6	655,32	218,4	310	392,6	487,68	162,6
320	407,3	304,8	193,04	320	405,3	671,70	223,9	320	405,3	508	169,3
330	420	304,8	193,04	330	417,9	688,50	229,5	330	417,9	528,32	176,1
340	432,7	304,8	193,04	340	430,6	705,71	235,2	340	430,6	548,64	182,9
350	445,5	314,96	199,5	350	442,4	723,35	241,1	350	443,6	583,18	194,4
360	458,2	314,96	199,5	360	453,5	741,43	247,1	360	454,7	597,76	199,3
370	470,9	325,12	205,96	370	464,8	759,97	253,3	370	466,1	612,71	204,3

380	483,6	325,12	205,96	380	476,4	778,97	259,6	380	477,7	628,03	209,4
390	496,4	335,28	212,42	390	488,3	780,54	266,1	390	489,7	643,73	214,6
400	509,1	335,28	212,42	400	500,5	789,23	270,1	400	501,9	659,82	220,0
410	521,8	335,28	212,42	410	513,0	795,10	276,3	410	514,5	676,31	225,5
415,34	528,6	345,44	218,69	420	525,9	806,95	279,1	420	527,3	693,22	231,1
				430	539,0	810,10	280,4	424,21	532,6	700,15	233,4
				436,45	547,1	812,37	282,4				



Anexo 4. Módulo Elástico de muestras de 600 Kg/cm²

Muestra 1				Muestra 2				Muestra 3			
Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]	Carga [KN]	Esfuerzo [kg/cm ²]	Deformación Dial [mm]x10 ⁻³	Def. Unit [εx10 ⁻⁵] [mm/mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
10	12,7	31,8	10,6	10	12,7	3,56	1,7	10	12,7	5,1	7,65
20	25,5	69,85	23,3	20	25,5	5,08	2,4	20	25,5	8,89	13,34
30	38,2	101,6	33,9	30	38,2	10,16	3,4	30	38,2	12,7	19,05
40	50,9	127	42,3	40	50,9	20,32	6,8	40	50,9	15,24	22,86
50	63,6	139,7	46,6	50	63,6	35,56	11,9	50	63,6	17,78	26,67
60	76,4	177,8	59,3	60	76,4	50,8	16,9	60	76,4	20,32	30,48
70	89,1	184,15	61,4	70	89,1	71,12	23,7	70	89,1	22,86	34,29
80	101,8	260,35	86,8	80	101,8	86,36	28,8	80	101,8	25,4	38,10
90	114,5	273,05	91	90	114,5	101,6	33,9	90	114,5	27,94	53,09
100	127,3	393,7	131,2	100	127,3	127	42,3	100	127,3	30,48	57,91
110	140	400,05	133,4	110	140	142,24	47,4	110	140	33,02	62,74
120	152,7	431,8	143,9	120	152,7	172,72	57,6	120	152,7	35,56	67,56
130	165,5	438,15	146,1	130	165,5	193,04	64,3	130	165,5	38,1	72,39
140	178,2	457,2	152,4	140	178,2	218,44	72,8	140	178,2	38,1	72,39
150	190,9	469,9	156,6	150	190,9	243,84	81,3	150	190,9	57,15	108,59
160	203,6	482,6	160,9	160	203,6	264,16	88,1	160	203,6	63,5	120,65
170	216,4	114,3	162,9	170	216,4	289,56	96,5	170	216,4	63,5	120,65
180	229,1	114,3	165,7	180	229,1	325,12	108,4	180	229,1	76,2	144,78
190	241,8	114,3	168,9	190	241,8	355,6	118,5	190	241,8	82,55	156,85
200	254,5	114,3	173,9	200	254,5	386,08	128,7	200	254,5	95,25	180,98
210	267,3	152,4	175,4	210	267,3	452,12	150,7	210	267,3	101,6	193,04
220	280	165,1	179,6	220	280	508	169,3	220	280	101,6	193,04
230	292,7	215,9	184,5	230	292,7	553,72	184,6	230	292,7	114,3	217,17
240	305,5	222,25	194,7	240	305,5	640,08	213,4	240	305,5	127	232,10
250	318,2	342,9	194,7	250	318,2	706,12	235,4	250	318,2	139,7	251,68
260	330,9	342,9	201,2	260	330,9	772,16	257,4	260	330,9	152,4	268,11
270	343,6	463,55	210,7	270	343,6	873,76	291,3	270	343,6	95,25	272,09
280	356,4	584,2	219,1	280	356,4	924,56	292,8	280	356,4	101,6	289,56
290	369,1	584,2	223,5	290	369,1	259,08	295,7	290	369,1	114,3	293,50
300	381,8	598,5	228,5	300	381,8	309,88	298,6	300	381,8	120,65	301,30
310	394,5	612,7	232,8	310	394,5	355,6	300,1	310	394,5	127	307,46
320	407,3	635,7	248,6	320	407,3	406,4	303,1	320	407,3	127	315,76
330	420	643,5	257,8	330	420	462,28	306,2	330	420	133,35	323,34
340	432,7	655,1	266,5	340	432,7	518,16	309,2	340	432,7	133,35	324,95
350	445,5	670,9	275,2	350	445,5	574,04	312,3	350	445,5	133,35	329,57

360	458,2	687,9	275,2	360	458,2	645,16	314,5	360	457,8	134,68	331,09
370	470,9	698,5	298,4	370	470,9	726,44	316,7	370	471,1	138,59	335,81
380	483,6	745,2	305,8	380	483,6	812,8	318,9	380	484,8	142,61	338,12
390	496,4	768,5	313,5	390	496,4	899,16	319,6	390	498,8	146,74	340,16
400	509,1	825,5	321,3	400	509,2	973,89	322,8	400	511,3	150,41	341,96
410	522,2	895,2	329,0	410	522,5	999,21	326,0	410	524,1	154,17	343,65
420	535,3	917,6	334,0	420	535,5	1024,19	327,3	420	537,2	158,03	345,18
430	548,7	940,5	337,1	430	548,9	1049,79	328,6	430	550,1	161,82	347,23
440	562,4	964,1	339,5	440	562,7	1076,04	329,9	440	564,9	166,19	349,85
440	562,4	964,1	339,5	440	562,7	1076,04	329,9	440	564,9	166,19	349,85
450	575,9	987,2	341,1	450	576,7	1102,94	331,2	450	578,5	170,18	350,47
456,75	584,5	1002,0	342,6	460	591,1	1130,51	331,6	451,5	581,4	171,03	350,47
				466,56	605,9	1158,77	331,6				

