



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**“DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO
METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm²”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

**PARRALES PLUA EDWING GEANCARLOS
QUIRUMBAY VERA MELANIE DAYANARA**

TUTOR:

ING. RAUL ANDRÉS VILLOA VERA, MSc.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2022

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**“DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN
UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210
Kg/cm²”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

**PARRALES PLUA EDWING GEANCARLOS
QUIRUMBAY VERA MELANIE DAYANARA**


TUTOR:

ING. RAUL ANDRÉS VILLO VERA, MSc.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2022

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Jonny Villao Borbor, MSc.
DIRECTOR DE CARRERA



Ing. Raúl Villao Vera, MSc.
DOCENTE TUTOR



Ing. Daniel Campoverde Campoverde, Mg.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, Mg.
DOCENTE UIC

Dedicado a Dios por otorgarme el gran regalo de la vida llenándome de fortaleza y sabiduría en toda mi formación académica.

A mis padres y hermanos, quienes siempre me han aconsejado y brindado su apoyo incondicional para que pueda cumplir mis metas y ser una persona de bien.

A mis abuelos, tíos y primos, por ser parte de mi vida acompañándome en cada uno de mis logros.

A mi compañera de tesis y demás amigos de la carrera, quienes hemos compartido momentos buenos y difíciles durante esta etapa universitaria.

A mis mascotas, por alegrarme mis días y noches con su cariño, fidelidad, compañía y lealtad.

Edwing Parrales Plua.

Dedicado a Dios por guiarme en todo momento, por fortalecerme en días difíciles.

A mis padres pilar fundamental en mi vida; por siempre apoyarme incondicionalmente, por sus consejos y sobre todo por su amor.

A mis hermanas; por hacer siempre mis días mejores, por creer y confiar en mí.

A mis abuelos y tíos; por sus consejos y motivación que hacen que no renunciemos a nuestros objetivos.

A mi compañero de tesis y amigos de la carrera, por su confianza y amistad demostrada durante mi vida universitaria.

A mis mascotas; por ser mi fiel compañero en todas las noches de desvelo.

Melanie Quirumbay Vera

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

Ing. Villao Vera Raúl Andrés, MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “**DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm²**” elaborado por los estudiantes **PARRALES PLUA EDWING GEANCARLOS** y **QUIRUMBAY VERA MELANIE DAYANARA**, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 4% de la valoración permitida.

Adjunto reporte de similitud.

TUTOR

f. 




Ing. Raúl Villao Vera, MSc.

C.I. 0924204290

Document Information

Analyzed document	Tesis PARRALES y QUIRUMBAY.docx (D142663328)
Submitted	8/4/2022 9:55:00 PM
Submitted by	Rvillao
Submitter email	rvillao@upse.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	rvillao.upse@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/3399/49254.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 5/13/2022 4:32:02 PM	 1
SA	UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA / Tesis Nanosilice Basurto Gonzalez.docx Document Tesis Nanosilice Basurto Gonzalez.docx (D126308674) Submitted by: lmoreno@upse.edu.ec Receiver: lmoreno.upse@analysis.arkund.com	 2
SA	RODRIGUEZ ROBERTO-TESIS.pdf Document RODRIGUEZ ROBERTO-TESIS.pdf (D20672623)	 1

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Edwing Geancarlos Parrales Plua y Melanie Dayanara Quirumbay Vera, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **“DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm²”**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

AUTORES

f.  _____

Parrales Plua Edwing Geancarlos.

Autor de Tesis.

C.I: 0931104921

f.  _____

Quirumbay Vera Melanie Dayanara.

Autora de Tesis.

C.I: 0928622372

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Raúl Villao Vera, MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “**DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm²**”, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, elaborado por el Sr. **PARRALES PLUA EDWING GEANCARLOS** y la Srta. **QUIRUMBAY VERA MELANIE DAYANARA**, egresados de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

TUTOR

f. 

Ing. Raúl Villao Vera, MSc.

Tutor

CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA

Certificación de Gramatólogo

Lic. ALEXI JAVIER HERRERA REYES

Magister En Diseño Y Evaluación

De Modelos Educativos

La Libertad, agosto 03 de 2022.

Certifica:

Que después de revisar el contenido del trabajo de titulación en opción al título de Ingeniero Civil de **PARRALES PLUA EDWING GEANCARLOS** y **QUIRUMBAY VERA MELANIE DAYANARA**, cuyo tema es: **“DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm²”** me permito declarar que el trabajo investigativo se encuentra idóneo y puede ser expuesto ante el jurado respectivo para la defensa del tema en mención.

Es todo cuanto puedo manifestar en honor a la verdad.



Lic. Alexi Javier Herrera Reyes, MSc.

Docente de Español A: Literatura

Cel: 0962989420

e-mail: alexiherrerareyes@hotmail.com

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a Dios por brindarnos sabiduría y ser nuestro guía en el transcurso de la carrera universitaria.

A nuestros padres por ser la principal fuente de motivación y apoyo en toda nuestra etapa universitaria.

Al Ingeniero Raúl Villao Vera por ser nuestro docente tutor del trabajo de titulación guiándonos y compartiendo sus conocimientos.

A la Ingeniería Lucrecia Moreno Alcívar por ser nuestra docente de la materia de titulación.

Al laboratorista Roger Magallanes por su disposición en el desarrollo de nuestros ensayos en el laboratorio de la Universidad Estatal Península de Santa Elena.

A nuestros compañeros: J. Meneses, R. Soriano, G. Chiadó y D. Salinas por su apoyo y amistad durante la carrera.

A los Directivos y Docentes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena por compartir cada experiencia y conocimiento a lo largo de nuestra carrera universitaria.

A nuestra prestigiosa Universidad Estatal Península de Santa Elena por darnos la oportunidad de culminar con éxito nuestros estudios para ser unos excelentes profesionales.

Parrales E. y Quirumbay M.

CONTENIDO

	Pág.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	vii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	viii
CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA	ix
AGRADECIMIENTOS	x
CONTENIDO	xi
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABLAS	xviii
RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 HIPÓTESIS	5
1.3.1 <i>Hipótesis General</i>	5
1.3.2 <i>Hipótesis Específicas</i>	5
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	6
1.5 ALCANCE	6
1.6 VARIABLES.....	7
1.6.1 <i>Variable Dependiente</i>	7

1.6.2	<i>Variable Independiente</i>	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO		8
2.1	MATERIALES	8
2.2	HORMIGÓN	9
2.3	HORMIGÓN DE PESO NORMAL	9
2.4	COMPONENTES DEL HORMIGÓN	9
2.4.1	<i>Cemento</i>	9
2.4.2	<i>Cemento Portland</i>	10
2.4.3	<i>Fabricación del Cemento Portland</i>	10
2.4.4	<i>Cemento hidráulico</i>	11
2.4.5	<i>Áridos</i>	12
2.4.6	<i>Agua</i>	12
2.4.7	<i>Agregados</i>	14
2.4.8	<i>Agregado fino</i>	15
2.4.9	<i>Agregado grueso</i>	15
2.4.10	<i>Puzolanas naturales</i>	17
2.4.11	<i>Caolín ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)</i>	17
2.4.12	<i>Metacaolín ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)</i>	17
2.4.13	<i>Método ACI</i>	18
2.4.14	<i>Ensayo de asentamiento del Cono de Abrams</i>	22
2.5	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN	22
2.5.1	<i>Resistencia a la compresión</i>	22
2.5.2	<i>Especificación de resistencia determinada mediante pruebas</i>	23
2.5.3	<i>Pruebas de resistencia en probetas</i>	24
CAPITULO III: METODOLOGÍA		25

3.1	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	25
3.2	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	26
3.3	METODOLOGÍA DEL O.E1: DISEÑAR DIVERSAS DOSIFICACIONES DE HORMIGÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE METACAOLÍN (5%, 10%, 15% Y 20%) COMO REEMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PARA OBTENER UNA RESISTENCIA MAYOR O IGUAL A 210 KG/CM ²	28
3.4	METODOLOGÍA DEL O.E2: REALIZAR UN DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN CON UNA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA QUE ALCANCE UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE F'C= 210 KG/CM ² PARA EL CONCRETO PATRÓN	29
3.5	METODOLOGÍA DEL O.E3: REALIZAR UN ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN ENTRE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN PATRÓN Y LAS PROBETAS DE HORMIGÓN CON LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE METACAOLÍN (5%, 10%, 15% Y 20%), DANDO A CONOCER LA DOSIFICACIÓN ADECUADA USANDO METACAOLÍN	29
3.6	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	30
3.7	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	31
3.8	EJECUCIÓN, ELABORACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	32
3.8.1	<i>Agregados gruesos y finos</i>	32
3.8.2	<i>Cemento</i>	45
3.8.3	<i>Metacaolín</i>	47
3.8.4	<i>Agua</i>	48
3.9	ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE HORMIGÓN	48
3.10	ENSAYO DE REVENIMIENTO DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.....	50
3.11	ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN.....	51
3.12	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	52

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	54
4.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO VOLUMÉTRICO SUELTO Y VARILLADO DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 858).....	54
4.1.1 <i>Peso volumétrico suelto del agregado grueso y fino</i>	54
4.1.2 <i>Peso volumétrico varillado del agregado grueso</i>	55
4.2 RESULTADOS DEL ENSAYO GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 696).....	55
4.2.1 <i>Granulometría del agregado grueso.....</i>	55
4.2.2 <i>Granulometría del agregado fino</i>	56
4.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (NTE INEN 857) Y AGREGADO FINO (NTE INEN 856).....	57
4.3.1 <i>Densidad y absorción del agregado grueso.....</i>	57
4.3.2 <i>Densidad y absorción del agregado fino</i>	58
4.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS (NTE INEN 862)	59
4.4.1 <i>Contenido de humedad del agregado grueso.....</i>	59
4.4.2 <i>Contenido de humedad del agregado fino</i>	59
4.5 DOSIFICACIÓN $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	59
4.5.1 <i>Muestra Patrón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.....</i>	59
4.5.2 <i>Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo de cemento por metacaolín.....</i>	61
4.5.3 <i>Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo de cemento por metacaolín.....</i>	63
4.5.4 <i>Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de reemplazo de cemento por metacaolín.....</i>	64
4.5.5 <i>Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo de cemento por metacaolín.....</i>	66

4.5.6. <i>Análisis y discusión de resultados de las muestras por cada porcentaje de metacaolín</i>	68
4.5.7. <i>Resistencia promedio a 7 días</i>	69
4.5.8. <i>Resistencia promedio a 14 días</i>	69
4.5.9. <i>Resistencia promedio a 21 días</i>	70
4.5.10. <i>Resistencia promedio a 28 días</i>	70
4.5.11. <i>Análisis y discusión de los resultados de las muestras de $f'c=210$ kg/cm² con distintos % de reemplazo por metacaolín por edad</i>	71
4.6 ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO	73
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
5.1 CONCLUSIONES.....	77
5.2 RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Tamizado de agregados	35
Figura 2 Peso del agregado grueso retenido en cada tamiz	35
Figura 3 Eliminación del exceso de agua del agregado grueso para el ensayo de D.S.S.S	39
Figura 4 Toma de pesos de la canastilla y material más la canastilla para la D.S.S.S	39
Figura 5 Secado al aire libre para eliminar exceso de agua en el agregado fino	43
Figura 6 Ensayo de cono para determinar el estado S.S.S del agregado fino.....	43
Figura 7 Agregado fino en estado S.S.S	43
Figura 8 Ensayo de D.S.S.S	43
Figura 9 Muestra de agregado fino	44
Figura 10 Muestra de agregado grueso	44
Figura 11 Muestra de agregado fino en horno por 24h.....	45
Figura 12 Muestra de agregado grueso en horno por 24h.....	45
Figura 13 Proporciones de materiales para la mezcla.....	49
Figura 14 Obtención de mezcla de hormigón	49
Figura 15 Ensayo de revenimiento.....	51
Figura 16 Medición de revenimiento	51
Figura 17 Elaboración de cilindros	52

Figura 18	Enrasado de cilindros.....	52
Figura 19	Curado de probetas de hormigón.....	52
Figura 20	Prensa hidráulica para ensayo de resistencia a compresión	53
Figura 21	Rotura de probetas	53
Figura 22	Toma de resultados.....	53
Figura 23	Toma de diámetros, altura y pesos de probetas.	53
Figura 24	Curva granulométrica del agregado grueso	56
Figura 25	Curva granulométrica del agregado fino	57
Figura 26	Gráfico de curvas de "Resistencia vs. Edad"	67
Figura 27	Gráfico de curvas de "Resistencia vs. %MK"	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tipos de Cementos Portland	11
Tabla 2 Requisitos físicos normalizados.....	13
Tabla 3 Análisis Granulométrico del árido fino.....	15
Tabla 4 Gradación para áridos gruesos	16
Tabla 5 Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.	19
Tabla 6 Requisitos aproximados de agua mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregado.....	20
Tabla 7 Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión	20
Tabla 8 Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas.	21
Tabla 9 Volumen de agregado grueso (m ³) por volumen unitario de concreto ..	21
Tabla 10 Cálculos tentativos del peso volumétrico del concreto fresco	22
Tabla 11 Requisitos de resistencia a compresión cuando se disponen de datos históricos de producción	23
Tabla 12 Corrección para datos estadísticos menores a 30 ensayos	24
Tabla 13 Requisitos de resistencia a la compresión cuando no se disponen de datos estadísticos	24
Tabla 14 Tipo de hormigón y su porcentaje de metacaolín.	27
Tabla 15 Operacionalización de variables	31

Tabla 16	Análisis químico del cemento	45
Tabla 17	Composición del cemento	46
Tabla 18	Análisis físicos del cemento.....	46
Tabla 19	Requisitos de componentes minerales	47
Tabla 20	Análisis químico del metacaolín y otros cementantes	47
Tabla 21	Características del KaMin R 70C.....	48
Tabla 22	Dosificación de hormigón de una $f'c$ 210 kg/cm ²	50
Tabla 23	Determinación de la masa unitaria suelta del agregado grueso	54
Tabla 24	Determinación de la masa unitaria suelta del agregado fino.....	55
Tabla 25	Determinación de la masa unitaria compactada del agregado grueso..	55
Tabla 26	Análisis granulométrico del agregado grueso	56
Tabla 27	Análisis granulométrico del agregado fino	57
Tabla 28	Determinación de densidad y porcentaje de absorción del árido grueso	58
Tabla 29	Determinación de densidad y porcentaje de absorción del árido fino .	58
Tabla 30	Determinación del contenido de humedad del árido grueso	59
Tabla 31	Determinación de contenido de humedad del árido fino	59
Tabla 32	Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	60
Tabla 33	Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	60
Tabla 34	Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	61

Tabla 35 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín.....	61
Tabla 36 Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín.....	62
Tabla 37 Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín	62
Tabla 38 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo por metacaolín.....	63
Tabla 39 Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo por metacaolín.....	63
Tabla 40 Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo por metacaolín	64
Tabla 41 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de reemplazo por metacaolín.....	64
Tabla 42 Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de reemplazo por metacaolín.....	65
Tabla 43 Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de reemplazo por metacaolín	65
Tabla 44 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo por metacaolín.....	66
Tabla 45 Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo por metacaolín.....	66
Tabla 46 Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo por metacaolín	67
Tabla 47 Resistencia a los 7 días para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín	69

Tabla 48 Resistencia a los 14 días para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín	69
Tabla 49 Resistencia a los 21 días para $f'c= 210\text{kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín.	70
Tabla 50 Resistencia a los 28 días para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín	70
Tabla 51 Análisis de precios unitario de Hormigón patrón de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$.	74
Tabla 52 Análisis de precios unitario de Hormigón de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución del 5% con metacaolín.....	75
Tabla 53 Análisis de precios unitario de Hormigón de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución del 10% con metacaolín.....	76

“DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm²”

Autores: Parrales Plua Edwing

Quirumbay Vera Melanie

Tutor: Ing. Villao Vera Raúl, MSc.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se diseñaron distintas mezclas de hormigón usando porcentajes del 5%, 10%, 15% y 20% de metacaolín como reemplazo del cemento con el objetivo de dar a conocer el porcentaje óptimo a emplearse con la cual se alcanzó una resistencia mayor a 210 kg/cm², de tal forma se realizaron ensayos a los agregados siguiendo las normas NEC y ASTM; también se fabricaron probetas de hormigón siguiendo el método ACI 211 y ensayadas a compresión mediante la rotura de cilindros de concreto, dando como resultado que las dosificaciones con 5% y 10% de metacaolín se obtuvo un incremento a los 28 días de resistencia a compresión del 4.18% y 2.04% respectivamente en relación al concreto patrón mientras que las dosificaciones con 15% y 20% obtuvieron pérdida de resistencia de 2.61% y 6.34% respectivamente, para lo cual se concluye que la dosificación que muestra una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm² es la que contiene 5% de metacaolín obteniendo una resistencia a la compresión de 224.67 kg/cm². Además, se realizó un análisis de precios de modo que el uso de metacaolín resulta costoso con relación al hormigón convencional.

PALABRAS CLAVE: Metacaolín, hormigón, mezcla, dosificación, resistencia a la compresión.

**“CONCRETE MIX DESIGN USING METAKAOLIN TO
OBTAIN A COMPRESSION STRENGTH GREATER THAN 210
Kg/cm²”**

Autores: Parrales Plua Edwing

Quirumbay Vera Melanie

Tutor: Ing. Villao Vera Raúl, MSc.

ABSTRACT

In this research work, different concrete mixes were designed using percentages of 5%, 10%, 15% and 20% of metakaolin as a replacement for cement with the objective of determining the optimum percentage to be used to achieve a resistance greater than 210 kg/cm², in such a way that aggregates were tested according to NEC and ASTM standards; concrete specimens were also manufactured following the ACI 211 method and tested in compression by breaking concrete cylinders, with the result being that dosages with 5% and 10% of metakaolin obtained an increase at 28 days in compressive strength of 4.18% and 2.04%, in relation to the standard concrete, while the dosages with 15% and 20% obtained a loss of resistance of 2.61% and 6.34% respectively, for which it is concluded that the dosage that shows a compressive strength greater than 210 kg/cm² is the one containing 5% metakaolin, obtaining a compressive strength of 224.67 kg/cm². In addition, a price analysis was carried out so that the use of metakaolin is cost effective in relation to conventional concrete.

KEYWORDS: Metakaolin, concrete, mixing, dosage, compressive strength.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria de la construcción ha reconocido la necesidad de mejorar o desarrollar nuevos métodos de elaboración de hormigones con diferentes propiedades para satisfacer las necesidades existentes en los diferentes requerimientos técnicos de las obras civiles.

De acuerdo con National Ready Mixed Concrete Association (2022) indica que la mayoría de mezclas de hormigón contienen aditivos de cemento que forman parte del material cementante del hormigón, estos materiales son a menudo subproductos de otros procesos o materiales naturales que pueden o no ser tratados antes de su uso en hormigón; algunos de estos materiales se denominan puzolanas, que por sí mismas no tienen propiedades cementantes, pero cuando se usan con cemento, reaccionan para formar componentes cementantes.

Además, se denominan materiales cementicios suplementarios que se utilizan ampliamente para reemplazar parcialmente el cemento, para mejorar ciertas propiedades como su resistencia a la compresión y reducir el costo del cemento.

En este ámbito, el presente trabajo de investigación plantea obtener la dosificación de mezcla de hormigón óptima que supere una resistencia a la compresión de $f'c$ 210 kg/cm², en las cuales se diseñaran dosificaciones con diferentes porcentajes de puzolana natural como el metacaolín reemplazando parcialmente el cemento mediante probetas de concreto. Adicionalmente se realizará el análisis de precios entre el hormigón simple y el hormigón con metacaolín para dar a conocer su factibilidad económica.

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel mundial las obras civiles en su mayoría han sido construidas empleando hormigón o concreto y reforzadas con acero estructural, sin embargo, cierto

porcentaje de estas obras se manifiestan con problemas mecánicos relacionados al hormigón como una reducción de su resistencia a la compresión y flexión, pérdida de resistencia al fuego, así como también pérdida de durabilidad y trabajabilidad a causa de factores físicos y químicos que influyen en la vida útil del hormigón como menciona Cabrera (2018, p. 17)

De acuerdo con Manobanda Laica (2013, p. 6) el Ecuador posee diversas zonas climáticas y regiones que condicionan la funcionalidad y durabilidad del concreto y es por eso que hoy en día se puede evidenciar en el campo de la ingeniería civil que existen muchos problemas de resistencia del hormigón, y de sus propiedades mecánicas en diversas obras y carreteras de pavimento rígido o estabilizadas con cemento.

La provincia de Santa Elena posee zonas costeras, es decir tienen conexión y acceso directo al mar lo que la convierte en una provincia turística, con el pasar de los años el desarrollo económico se han construido edificaciones de varios niveles los cuales han necesitado que el hormigón tenga una resistencia a la compresión alta, como consecuencia del efecto salino de la brisa del mar el hormigón ha ido perdiendo sus propiedades además produce oxidación a los elementos de acero lo cual incide en el comportamiento estructural de las edificaciones como indican Jiménez et. al (2017, p. 8)

También, en la provincia de Santa Elena se emplea la mezcla de hormigón convencional, motivo por el cual es evidente que no hay conocimiento de las distintas alternativas que se le puede dar al hormigón para mejorar sus propiedades y por tal razón también se desconoce el uso del metacaolín en el ámbito de la construcción, incluso las ventajas y beneficios que otorga la adición de este mineral puzolánico en mezclas de hormigón para la construcción de proyectos y obras civiles.

El metacaolín como material cementante suplementario por sí mismo posee muy poco valor cementante, pero que debido a sus partículas finas y en presencia de humedad reaccionan químicamente adquiriendo propiedades cementantes haciendo que el hormigón mejore su resistencia en su estado endurecido.

Por eso en este trabajo de investigación experimental emplearemos el uso del metacaolín KaMin® 70C para realizar un diseño de mezcla de hormigón con una dosificación óptima para mejorar la resistencia a la compresión. La investigación se acoge a la siguiente pregunta ¿Cuál será la dosificación óptima con diferentes porcentajes de metacaolín para obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm²?

1.2 ANTECEDENTES

Como mencionan Cordero et. al (2012, p. 7) el hormigón es un material muy usado desde inicios del siglo XX en el campo de la construcción debido a su propiedad particular; es muy fuerte en compresión, pero débil en tensión por lo que se lo combina con acero de refuerzo para compensar esta desventaja. Sin embargo, con el avance de la tecnología del concreto se han realizado pruebas y ensayos para mejorar la resistencia a la compresión del concreto y mejorar las propiedades mecánicas mediante el uso de materiales adicionales, como lo son los aditivos minerales. Se han hecho investigaciones con diferentes materiales como cenizas volantes, metacaolín, humo de sílice, escoria de alto horno, árido reciclado, árido plástico, etc., que pueden utilizarse como alternativa al cemento y los áridos.

El hormigón convencional a pesar de sus buenas características y propiedades mecánicas con el pasar del tiempo y por efectos físicos y químicos pierden su resistencia a la compresión inicial y también se presenta pérdidas en las propiedades mecánicas como lo son la permeabilidad, tenacidad, etc., haciendo que el mismo se debilite y se desintegre presentando problemas de serviciabilidad en las edificaciones.

En investigaciones realizadas por Mansour y Al Biajawi (2022) demuestran que el uso del metacaolín como material cementoso suplementario en hormigón mejoraron aspectos principales como en sus propiedades mecánicas: trabajabilidad y tiempos de fraguado; resistencia a la compresión y durabilidad a largo plazo, el metacaolín se demuestra como una puzolana eficaz que mejora significativamente la estructura del poro por lo tanto mejora en gran medida la resistencia en edades tempranas al mismo tiempo mejora la permeabilidad.

De acuerdo con Chandak y Pawade (2018, p. 37) plantean que el metacaolín es muy diferente de otros materiales cementicios complementarios como las cenizas volantes, escoria o humo de sílice, ya que no es un subproducto de un proceso industrial; el metacaolín es un material puzolánico, la cual se genera por calcinación de arcilla caolín a una temperatura de 650° y 800°C dependiendo de las características del caolín como la pureza y cristalinidad de la arcilla.

Elizondo et. al (2020, p. 1) expresan que en los últimos años ha llamado la atención el material puzolánico denominado metacaolín debido a su alta resistencia así mismo una buena resistencia química; lo cual se han obtenido resultados en base a estudios donde demostraron que al reemplazar el 5 % del cemento con metacaolín puede aumentar tanto la permeabilidad como la resistencia a la tracción indirecta.

Díaz (2012, p. 103) indica que se ha realizado investigaciones debido a la composición química y a la estructura cristalina amorfa del metacaolín además se evidencia ventajas en el incremento de las propiedades mecánicas, incremento en la resistencia y durabilidad del cemento adicionado con metacaolín debido a su actividad puzolánica.

Torres et. al (2011) de la universidad de Bogotá realizaron el estudio del efecto de porcentajes de adición de metacaolín elaborado por caolín procedente de Antioquia; dicho caolín fue sometido a un tratamiento térmico por un período de dos horas a una temperatura de 700 °C en el cual observaron que la adición de este material puzolánico influye notoriamente en las propiedades del concreto y con los diferentes contenidos de metacaolín aumenta ligeramente la resistencia a la compresión.

Santos et. al (2020, p. 8) señalan que el metacaolín al ser agregado al hormigón proporcionó un aumento en su resistencia mecánica pero una disminución de la porosidad aparente de las mezclas lo cual contribuye a una reducción de la intensidad de reacciones de carbonatación.

Teniendo en cuenta a Zhang et. al (2022, p. 2) mencionan que en estudios previos confirmaron que el uso de metacaolín como aditivos minerales puede mejorar las

propiedades mecánicas y la microestructura del hormigón, incluida la resistencia, la porosidad y la producción; mientras que el hormigón no reforzado es un material frágil típico con baja resistencia a la tracción y tenacidad.

1.3 HIPÓTESIS

1.3.1 Hipótesis General

Mediante las mezclas de hormigón utilizando metacaolín se podrá obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm².

1.3.2 Hipótesis Específicas

H.E1. A través de las diversas dosificaciones con porcentajes varios de metacaolín reemplazando parcialmente al cemento se obtendrá una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm².

H.E2. Por medio de una dosificación óptima el concreto patrón alcanzará una resistencia a la compresión de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

H.E3. En base a los resultados que se obtendrán mediante el ensayo a compresión a las probetas de hormigón, se conocerá la dosificación con el porcentaje adecuado de metacaolín.

1.4 OBJETIVOS

Para la realización de este trabajo de investigación se plantean los siguientes objetivos generales y específicos.

1.4.1 Objetivo General

Diseñar la mezcla de hormigón utilizando metacaolín para obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm².

1.4.2 *Objetivos Específicos*

O.E1. Diseñar diversas dosificaciones de hormigón con varios porcentajes de metacaolín (5%, 10%, 15% y 20%) como reemplazo parcial del cemento para obtener una resistencia mayor o igual a 210 kg/cm².

O.E2. Realizar un diseño de mezcla de hormigón con una dosificación óptima que alcance una resistencia a la compresión de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ para el concreto patrón.

O.E3. Realizar un análisis de los resultados obtenidos de los ensayos a compresión entre las probetas de hormigón patrón y las probetas de hormigón con los diferentes porcentajes de metacaolín (5%, 10%, 15% y 20%), dando a conocer la dosificación adecuada usando metacaolín.

1.5 ALCANCE

El hormigón o concreto es un material muy usado en el ámbito de la construcción y siempre va a estar presente en cualquier proyecto u obra civil que se lleve a cabo en el futuro, es por eso que se debe tomar en cuenta las distintas alternativas y posibilidades que se le puede dar al hormigón empleando aditivos minerales en especial los puzolánicos que son los que le proporcionan mejoras en la resistencia compresiva así como también mejoran las propiedades mecánicas del concreto en comparación a otros aditivos químicos, reduciendo así los efectos negativos que causan los distintos factores físicos y químicos debido a la diversidad de regiones con sus climas que afectan el comportamiento y la vida útil del hormigón.

El trabajo de investigación beneficiara al campo de la ingeniería civil ofreciendo el uso del mineral puzolánico metacaolín en las mezclas de hormigón para conseguir una mejora en la resistencia a la compresión como alternativa a la mezcla de hormigón convencional que es la más se emplea en obras civiles, y también será de gran ayuda para futuras investigaciones o trabajos de grado que se lleven a cabo respecto a la aplicación del metacaolín como aditivo en mezclas de hormigón.

Además, va asociado con el objetivo de Desarrollo Sostenible 11: Ciudades y comunidades sostenibles, lo cual es lograr que las ciudades y asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resistentes y sostenibles. La metas del objetivo de Desarrollo Sostenible 11 para 2030 es asegurar el acceso de todas las personas a viviendas seguras y asequibles (NACIONES UNIDAS, 2022)

Con este trabajo se busca dar a conocer en la provincia de Santa Elena el porcentaje óptimo de metacaolín como material puzolánico suplementario que nos brinde una resistencia a la compresión mayor a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ mediante la fabricación de probetas cilíndricas y ensayos de resistencia a la compresión simple en laboratorio.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variable Dependiente

Resistencia a la compresión mayor a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

1.6.2 Variable Independiente

Dosificación con los porcentajes de metacaolín con relación al peso del cemento.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 MATERIALES

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 25) define a un material de construcción es cualquier producto procesado o fabricado destinado a ser incorporado con carácter permanente en cualquier obra, sea de edificación o de ingeniería civil. En general los materiales de construcción son materias primas, productos o subproductos empleados con frecuencia por ende deberán cumplir los siguientes requisitos establecidos en la NEC para asegurar su calidad:

- ✓ Resistencias mecánicas acordes con el uso que recibirán (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Estabilidad química (resistencia a agentes agresivos) (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Estabilidad física (dimensional) (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Seguridad para su manejo y utilización (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Protección de la higiene y salud de obreros y usuarios (NEC 2015, p. 25)
- ✓ No conspirar contra el ambiente (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Aislamiento térmico y acústico (colaborar en el ahorro de energía) (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Estabilidad y protección en caso de incendio (resistencia al fuego) (NEC 2015, p. 25)
- ✓ Comodidad de uso, estética y economía (NEC 2015, p. 25)

2.2 HORMIGÓN

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 11) define al hormigón como una mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. Para Soto y Villegas (2019, p. 12) el hormigón es un material pétreo artificial obtenido a partir de una mezcla de cemento, agua y agregados mineral, en determinadas proporciones; esta mezcla consiste en cemento y agua que, al solidificarse, se une a los agregados formando una masa cohesiva debido a la reacción química entre estos componentes.

2.3 HORMIGÓN DE PESO NORMAL

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 11) define al hormigón de peso normal como el hormigón que contiene agregados que cumplen con lo especificado en ASTM C33.

Según ASTM Standard C33-03 (2003) define los requerimientos de granulometría y la calidad de los agregados finos y gruesos (diferente de los agregados livianos o pesados) para usarse en el concreto.

2.4 COMPONENTES DEL HORMIGÓN

2.4.1 Cemento

Como señala Elster (2006, p. 15) el uso habitual del cemento es en combinación con otros materiales, especialmente con áridos, para formar morteros y hormigones. Mezclado con agua, el cemento se endurece tanto al aire como sumergido en agua.

De acuerdo con CEMEX (2022) el cemento es un polvo fino que se obtiene del proceso de calcinación a 1450°C de la mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro, el producto que se usa durante la calcinación es el Clinker, ingrediente

principal del cemento. El cemento es el material de construcción más usado mundialmente debido a que brinda propiedades útiles como la resistencia a la compresión, durabilidad y para una diversidad de aplicaciones en la construcción.

2.4.2 Cemento Portland

Según la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN151 (2010, p. 2) define que el cemento portland es un tipo de cemento hidráulico que se produce por pulverización de Clinker, consistente principalmente de silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos y que normalmente contiene los siguientes elementos: sulfatos de calcio, agua, y hasta 5% de piedra caliza. En la Tabla 1 se detalla los tipos de cementos Portland.

2.4.3 Fabricación del Cemento Portland

Como señala America's Cement Manufacturers PCA (2019) el método más común para hacer cemento Portland es el drywall. El primer paso es la extracción de las principales materias primas, que incluyen principalmente piedra caliza, arcilla y otros materiales. Después de la extracción, la piedra se tritura. Hay varias etapas para esto. La primera trituración reduce la roca a un tamaño máximo de unas 6 pulgadas. Luego, la roca se envía a una trituradora secundaria o molino de martillos, que se tritura hasta unas 3 pulgadas o menos.

La roca triturada se combina con otros materiales como mineral de hierro o cenizas volantes y se muele, se mezcla y se alimenta a un horno de cemento, el cual debe calentar en un horno rotativo de acero revestidos con ladrillos refractarios especiales junto con los otros materiales a unos 2700°F (America's Cement Manufacturers PCA, 2019)

La materia prima finamente molida se transfiere al extremo superior mientras que en el extremo inferior se produce una llamarada, creada por la combustión controlada con precisión de carbón en polvo, petróleo, combustibles alternativos (America's Cement Manufacturers PCA, 2019)

A medida que el material se mueve a través del horno, ciertos materiales son expulsados en forma de gases, los materiales restantes se unen para formar una nueva sustancia llamada escoria; el clinker sale del horno en forma de bolas grises, del tamaño de canicas lo cual se deja enfriar para que las plantas de cemento procedan a molerlo y mezclarlo con pequeñas cantidades de yeso y piedra caliza y como resultado obtenemos el cemento listo para ser transportado a las diversas empresas constructoras (America´s Cement Manufacturers PCA, 2019)

Tabla 1

Tipos de Cementos Portland

	TIPO	DESCRIPCIÓN	NORMA	
			INEN	ASTM
PUROS	I	Uso común	152	C 150
	II	Moderada resistencia a sulfatos Moderado calor de hidratación	152	C 150
	III	Elevada resistencia inicial	152	C 150
	IV	Bajo calor de hidratación	152	C 150
	V	Alta resistencia a la acción de los sulfatos	152	C 150
Los tipos IA, IIA, IIIA incluyen incorporador de aire				
COMPUESTOS	IS	Portland con escoria de altos hornos	490	C 595
	IP	Portland puzolánico	490	C 595
	P	Portland puzolánico (Cuando no se requiere resistencias iniciales altas)	490	C 595
	I (PM)	Portland puzolánico modificado	490	C 595
	I (SM)	Portland con escoria modificado	490	C 595
	S	Cemento de escoria	490	C 595
POR DESEMPEÑO	GU	Uso en construcción en general	2380	C 1157
	HE	Elevada resistencia inicial	2380	C 1157
	MS	Moderada resistencia a los sulfatos	2380	C 1157
	HS	Alta resistencia a los sulfatos	2380	C 1157
	MH	Moderado calor de hidratación	2380	C 1157
	LH	Bajo calor de hidratación	2380	C 1157

Si adicionalmente tiene R, indica baja reactividad con áridos álcali-reactivos

Nota: Clasificación de cementos Portland por su tipo, tomada del *INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO INECYC (2007)*

2.4.4 Cemento hidráulico

Citando a la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN151 (2010, p. 2) “Cemento Hidráulico. Definición de Términos” que define los términos relacionados con los cementos hidráulicos, sus componentes, características y sus propiedades establece que el cemento hidráulico es un cemento que fragua y endurece por reacción química con agua y es capaz de hacerlo aún bajo agua.

a) **Cemento Holcim Tipo GU.** Holcim Ecuador S.A (2015) menciona que el cemento Holcim Fuerte Tipo GU está diseñado para todo tipo de construcción, en general, contando con principales características como su resistencia, durabilidad y desempeño que satisface y excede los estándares de calidad de la norma NTE INEN 2380.

Como señala la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2380 (2011, p. 3) el cemento del tipo especificado debe cumplir con todos los requisitos físicos normalizados aplicables en la Tabla 2.

2.4.5 Áridos

Citando a la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 102) indica que el material granulado debe constar de al menos dos partes de diferentes tamaños; agregado grueso, las partículas suelen ser más grandes que 0.475 cm de diámetro nominal y el árido fino, cuyo tamaño de partículas está entre 75 μm y 0.475 cm; estos a su vez, se pueden separar en dos o tres tamaños diferentes.

2.4.6 Agua

Según la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 104) el agua desempeña un gran papel importante en el hormigón debido a que es el componente que hace su combinación con el cemento lo cual produce la pasta que aglutina las partículas del árido, las mantiene unidas y colabora en gran medida con la resistencia junto a todas las propiedades mecánicas del hormigón.

El agua que se emplea en la mezcla de hormigón debe cumplir con la norma ASTM C 1602 esta especificación indica la composición y desempeño de los requisitos de mantenimiento para el agua a utilizarse como agua de mezcla de hormigón de cemento hidráulico. Para la elaboración del hormigón se permite el uso del agua potable y casi cualquier agua natural que se pueda beber y que no tenga sabor u olor, sin realizar pruebas de conformidad con los requisitos especificados.

Tabla 2
Requisitos físicos normalizados

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Finura	INEN 196	A	A	A	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	INEN 200	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Tiempo de fraguado, método de Vicat ^B	INEN 158						
Inicial, no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45
Inicial, no más de, minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	C	C	C	C	C	C
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo ^D	INEN 488						
1 día		..	12	..	..	..	..
3 días		13	24	11	11	5	..
7 días		20	..	18	18	11	11
28 días		28	..	..	25	..	21
Calor de hidratación 7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo	INEN 199	..	..	..	..	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		..	..	..	..	..	290 (70)
Expansión en barra de mortero 14 días, % máximo	INEN 2529	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos) ^E	INEN 2503						
6 meses, % máximo		..	..	0.10	0.05	..	..
1 año, % máximo		..	..	..	0.10	..	..

^A El porcentaje retenido en el tamiz de 45µm (No. 325) por vía húmeda y el área de la superficie específica determinada en el equipo de permeabilidad al aire en m²/kg, ambos deben ser informados en todos los certificados de resultados requeridos al fabricante.

^B El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTE INEN 158.

^C Se debe informar el contenido de aire en todos los certificados de resultados de ensayos requeridos al fabricante. El valor obtenido en el mortero no garantiza necesariamente que el contenido de aire en el hormigón sea el mismo.

^D Los cementos pueden ser despachados antes que estén disponibles los datos de ensayo de mayor edad. En tales casos, el valor del ensayo puede dejarse en blanco. Alternativamente, el fabricante puede proveer valores estimados basados en datos históricos de producción. El informe debe indicar si se proporcionan tales estimaciones.

^E En los ensayos de cemento HS, no se requieren los ensayos a un año cuando el cemento cumple con el límite a 6 meses. Un cemento HS que no cumple con el límite a 6 meses, no debe ser rechazado a menos que tampoco cumpla el límite a un año.

Nota: Requisitos físicos que deben cumplir los cementos hidráulicos para su desempeño según la *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2380 (2011, p. 3)*

a) **Relación Agua/ Cemento.** La relación agua/ cemento es otro aspecto que se puede controlar en el proceso de la fabricación del hormigón, la cual la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 25) define que la relación agua/ cemento (a/c) es la que determina la resistencia del material y la protección a los agentes agresivos, controlando estas variables es posible garantizar un hormigón de duración satisfactoria.

2.4.7 Agregados

Rodríguez (2016, p. 11) define a los agregados como partículas que se encuentran en la naturaleza en varios tamaños y formas, o como producto de la piedra triturada.

En el concreto estructural, estos agregados pueden ocupar del 60% al 75% del volumen del concreto, y la proporción de componentes mezclados se ajusta por propiedades físicas y mecánicas, por lo que afecta las propiedades del concreto fresco y endurecido.

a) Clasificación de los agregados

Agregado fino: Sus partículas pasan casi totalmente el tamiz #4 (tamaño 4.75mm), y son retenidas en el tamiz #200 (tamaño 75 μ m), conocido como arena (Rodríguez 2016, p. 11).

Agregado grueso: Son las partículas retenidas por el tamiz #4 (tamaño 4.75mm), conocido como grava (Rodríguez 2016, p. 11).

Fragmentos de roca: Agregados con tamaño mayor a 3" (tamaño 75mm), se lo utiliza en la preparación del hormigón ciclópeo (Rodríguez 2016, p. 11).

Agregado ligero: Tienen una baja densidad y resistencia limitada a la compresión, utilizados en la fabricación de los llamados hormigones ligeros (Rodríguez p. 11).

2.4.8 Agregado fino

Según ASTM Standard C33-03 (2003, p. 8) manifiesta que el agregado fino consistirá de arena natural, arena manufacturada o una combinación de ambas.

a) **Análisis granulométrico.** De acuerdo con la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872 (2011, p. 2) el árido fino debe ser graduado dentro de los siguientes límites mostrados a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3
Análisis Granulométrico del árido fino

Tamiz (NTE INEN 154)	Porcentaje que pasa
9.5 mm	100
4.75 mm	95 a 100
2.36 mm	80 a 100
1.18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	5 a 30
150 µm	0 a 10

Nota: Límites para el análisis granulométrico de áridos finos de acuerdo a la NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872 (2011, p. 2)

2.4.9 Agregado grueso

La NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872 (2011, p. 3) manifiesta que el árido grueso debe consistir en grava, grava triturada, piedra triturada, escoria de altos hornos enfriada al aire u hormigón de cemento hidráulico triturado o una combinación de estos, de acuerdo con los requisitos de esta norma.

a) **Gradación para áridos gruesos.** La NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872 (2011, p. 4) señala que “el árido grueso debe cumplir con los requisitos para el número de tamaño especificado, indicados a continuación en la Tabla 4; se puede aceptar el uso de áridos que no cumplan precisamente con los requisitos de gradación siempre que el árido propuesto haya sido evaluado con pruebas previas de desempeño con buenos resultados

Tabla 4
Gradación para áridos gruesos

Número de tamaño	Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas) (mm)	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas)													
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	300 µm
1	de 90 a 37.5	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 5						
2	de 63 a 37.5			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5						
3	de 50 a 25				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
357	de 50 a 4.75				100	95 a 100		37 a 70		10 a 30					
4	de 37.5 a 19					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15		0 a 5				
467	de 37.5 a 4.75					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5			
5	de 25 a 12.5						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5				
56	de 25 a 9.5						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5			
57	de 25 a 4.75						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5		
6	de 19 a 9.5							100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5			
67	de 19 a 4.75							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5		
7	de 12.5 a 4.75								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5		
8	de 9.5 a 2.36									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
89	de 9.5 a 1.18									100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 ^A	de 4.75 a 1.18										100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

^A Al árido con número de tamaño 9, se lo define en la NTE INEN 694 como árido fino. Se lo incluye como árido grueso cuando está combinado con número de tamaño 8 para crear el número de tamaño 89, que es árido grueso según se define en la NTE INEN 694.

Nota: Requerimientos de gradación de áridos gruesos según la *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872 (2011, p. 5)*

2.4.10 *Puzolanas naturales*

Orchesi (2019, p. 22) menciona que las puzolanas naturales son de origen volcánico y estos materiales silíceos tienden a ser reactivos si se enfrían rápidamente además para adicionarse al cemento tienen que cumplir con la especificación de la normativa ASTM C618.

La norma ASTM Standard C618 (2008) define a la puzolana como un material silíceo que, por sí mismo, tiene poco o ningún valor aglutinante, pero está finamente molido y, en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura normal y formar compuestos con propiedades adhesivas.

2.4.11 *Caolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)*

Rodríguez (2016, p. 5) define al caolín como “un silicato de aluminio hidratado, principalmente se obtiene de la descomposición de rocas feldespáticas. El término caolín describe a las arcillas en las que predomina la caolinita”.

2.4.12 *Metacaolín ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)*

De acuerdo con Singh y Murugan (2022, p. 2) indican que el metacaolín actúa como un compuesto puzolánico natural obtenido a través de la calcinación y deshidroxilación de arcillas caolinitas en rangos de temperaturas altas de 500 °C a 900 °C.

En el estudio realizado por Plank et. al (2022, p. 8) mencionan que el alto contenido de metacaolín presente en la arcilla calcinada fomenta mayor reactividad puzolánica y ejerce un efecto positivo en el desarrollo temprano de la resistencia es decir mejora la resistencia además al usar altos contenidos o porcentajes de metacaolín aumenta la demanda de agua a las mezclas de hormigón de igual manera en presencia del superplastificante y la finura de las partículas del metacaolín provoca una dosificación excesivamente alta para lograr la trabajabilidad.

National Ready Mixed Concrete Association (2022, p. 2) señala que el metacaolín y las arcillas p esquistos calcinados se producen a partir de arcillas caolinitas respectivamente puras las cuales se emplean entre 5 y 15% en peso de los materiales cementantes mientras que las arcillas o esquistos calcinados son utilizados a mayores porcentajes.

Según Wang (2018, p. 5) revela que el nivel óptimo de reemplazo de cemento por metacaolín es de alrededor del 10 y 20%, que proporciona al hormigón la máxima resistencia; además el metacaolín parece tener un excelente potencial como material cementante complementario en estructuras hechas de concreto de alto rendimiento.

ASTM Standard C331-07 (2007) menciona que es necesario realizar mezclas de prueba con varios porcentajes de ceniza volante o puzolana natural para determinar la cantidad necesaria para obtener una resistencia adecuada; los porcentajes utilizados deben ser a partir del 2%.

2.4.13 *Método ACI*

Citando a Vargas (2017, p. 60) define al método ACI como el proceso de diseño se puede hacer mezclando los materiales en masa absoluta y luego calculando el peso de cada componente o directamente calculando el peso del concreto y luego restando el peso de cada componente, siempre para obtener un metro cúbico de concreto. Aquel método propuesto de cálculo tiene en cuenta todo lo relacionado con la facilidad de instalación, la resistencia a la compresión o a la flexión, la durabilidad y la economía; también tiene una gran ventaja; se puede programar fácilmente para un manejo de métodos rápido y conveniente.

De acuerdo con Cáceres y Chira (2021, p. 13) indican que el método ACI es el más conocido y empleado para el diseño de mezclas de hormigón con materiales que deben cumplir los parámetros apropiados para agregados gruesos y finos, además que se puede realizar la corrección del asentamiento corrigiendo la cantidad de agua, pero manteniendo la misma relación agua/cemento incluso

manteniendo la cantidad del agregado grueso; basándose en algunas tablas que fueron elaboradas mediante ensayos de agregados que nos permiten conseguir valores de los diferentes materiales que integran el metro cúbico de la mezcla de hormigón.

a) ***Procedimiento para el diseño de mezclas por el método ACI 211.1***

Se debe determinar la resistencia promedio (f'_{cr}) a partir de la resistencia especificada, en caso de no contar con un registro de resultados de ensayos se escoge la Tabla 13 que se encuentra más adelante; luego se realiza la selección del asentamiento o revenimiento de acuerdo con el tipo de construcción de acuerdo con la Tabla 5.

Tabla 5

Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.

Tipo de construcción	Revenimiento (cm)	
	Máximo*	Mínimo
Muros de subestructura sencillos, zapatos, muros y cajones de cimentación	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

Nota: * Pueden incrementarse en 2.5 cm cuando los métodos de compactación no sean mediante vibrado. Tomado de *ACI 211.1-91. Tabla 6.3.1*

De acuerdo con la norma de diseño estructural se recomienda que Tamaño Nominal Máximo (TNM) del agregado grueso se encuentre disponible y sea económico siempre y cuando cumpla con las dimensiones y características especificadas, este tamaño nominal máximo se determina mediante el ensayo de granulometría.

En la siguiente Tabla 6 realizada por el ACI 211.1 se determina el volumen unitario de agua o agua de diseño que se necesita para la mezcla del hormigón considerando el concreto sin aire incluido lo cual se realiza en

base al asentamiento o revenimiento y el agregado grueso dependiendo del tamaño máximo nominal obtenido del ensayo de granulometría.

Tabla 6

Requisitos aproximados de agua mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregado

Revenimiento (cm)	Tamaño máximo de la grava (mm)							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
2.5 -> 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 -> 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 -> 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Aire atrapado aprox. (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
2.5 -> 5	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 -> 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 -> 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado de aire a incluir según el tipo de exposición (%)								
Exposición Ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición Moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición Severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Nota: Tomado de ACI 211.1-91. Tabla 6.3.3

Se procede a realizar la relación agua/cemento dependiendo de la resistencia a la compresión a los 28 días requerida de acuerdo con la Tabla 7, si se trata de un hormigón sujeto a exposiciones severas se escoge relaciones agua/cemento máximas permisibles presentadas en la Tabla 8.

Tabla 7

Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm ²)	Relación agua/cemento (a partir del peso)	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Nota: Tomado de ACI 211.1-91. Tabla 6.3.4 (a)

Tabla 8

Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas.

Tipo de estructura	Estructura continua o frecuentemente mojada y expuesta a congelación y deshielo	Estructura expuesta al agua de mar o a sulfatos
Secciones esbeltas y secciones con menos de 3 cm	0.45	0.40
Resto de estructuras	0.50	0.45

Nota: Tomado de ACI 211.1-91. Tabla 6.3.4 (b)

Se determina el factor cemento dividiendo el volumen unitario de agua entre la relación agua/cemento escogido de acuerdo con las especificaciones, luego para determinar el contenido de agregado grueso por m³ se realiza mediante el tamaño máximo nominal del agregado y el módulo de finura del agregado fino en este caso de la arena de acuerdo con la Tabla 9.

Tabla 9

Volumen de agregado grueso (m³) por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo del agregado grueso (mm)	Módulo de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota: Tomado de ACI 211.1-91. Tabla 6.3.6

Para determinar el contenido de agregado fino se resta 1 a la suma de los volúmenes absolutos de los agregados; el peso del agregado fino será igual al volumen absoluto multiplicado por el peso sólido, así se obtendrán los valores de diseño. Se debe realizar la corrección por humedad del agregado a las proporciones que integran el metro cúbico con el fin de obtener los valores a utilizarse en obra. En la Tabla 10 se muestra el cálculo tentativo del peso volumétrico del concreto fresco.

Tabla 10*Cálculos tentativos del peso volumétrico del concreto fresco*

Tamaño máximo del agregado grueso (mm)	Peso volumétrico tentativo del concreto (kg/m³)	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
9.5	0.50	0.48
12.5	0.59	0.57
19	0.66	0.64
25	0.71	0.69
37.5	0.75	0.73
50	0.78	0.76
75	0.82	0.80
150	0.87	0.85

Nota: Tomado de ACI 211.1-91. Tabla 6.3.7.1

2.4.14 *Ensayo de asentamiento del Cono de Abrams*

Torrent (2020, p. 6) indica que este método de ensayo es el más utilizado debido a que es muy preciso, económico y rápido, se realiza golpeando el cono abatido con la varilla lo cual da indicios de segregabilidad; este ensayo se desarrolla para la evaluación de la consistencia del hormigón fresco y así mantener el asentamiento dentro de los límites establecidos.

2.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

2.5.1 *Resistencia a la compresión*

Según la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 31) menciona que el hormigón debe cumplir con los requisitos de resistencia estructural y condiciones de exposición ambiental.

Se utilizarán los siguientes valores de resistencia especificada a la compresión:

- ✓ Valor mínimo para el hormigón normal $f'c = 214.07 \text{ kg/cm}^2$
- ✓ Valor máximo para elementos de hormigón liviano $f'c = 356.78 \text{ kg/cm}^2$

2.5.2 Especificación de resistencia determinada mediante pruebas

De acuerdo con la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 31) indica que “la evaluación de los resultados de pruebas de resistencia del hormigón tiene en cuenta que la producción está sometida a variaciones en los componentes, medición, pruebas y resultados de los ensayos”.

A causa de esta variabilidad, se debe dosificar el hormigón de una manera que se obtenga una resistencia promedio f'_{cr} muy por encima de la especificada f'_c , esta resistencia promedio deberá calcularse en base a un análisis estadístico de la experiencia previa en la producción de hormigón mostrada en la Tabla 11 y Tabla 12, también podría ser considerando sobre un diseño mostrada en la Tabla 13 cuando no se cuenta con registros estadísticos.

Tabla 11

Requisitos de resistencia a compresión cuando se disponen de datos históricos de producción

Resistencia especificada f'_c (MPa)	Resistencia media requerida f'_{cr} (MPa)
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las 2 ecuaciones: $f'_{cr} = f'_c + 1.34 S_s$ $f'_{cr} = f'_c + 2.33 S_s - 3.5$
$f'_c > 35$	Usar el mayor valor obtenido de las 2 ecuaciones: $f'_{cr} = f'_c + 1.34 S_s$ $f'_{cr} = 0.9f'_c + 2.33 S_s$

Donde:

f'_c Resistencia especificada a la compresión del hormigón (MPa)

f'_{cr} Resistencia media requerida (MPa)

S_s Desviación estándar de la muestra (MPa)

Nota: Especificación de Resistencia determinada mediante pruebas. Tomado de la NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 31)

Se determina el valor de desviación estándar de la muestra (S_s) conforme a lo expuesto en el ACI 318, en el cual se aplicará un factor de corrección en los siguientes casos mostrados en las Tablas 12 y 13:

Tabla 12*Corrección para datos estadísticos menores a 30 ensayos*

Número de ensayos	Factor de corrección para la desviación estándar S_s de la muestra
Menos de 15	N.A.
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

Nota: Corrección para datos estadísticos menores a 30 ensayos. Tomado de la *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 32)*

Cuando no se dispone de información estadística de ensayos, se utilizará la siguiente Tabla 13 para determinar la resistencia promedio f'_{cr} .

Tabla 13*Requisitos de resistencia a la compresión cuando no se disponen de datos estadísticos*

Resistencia especificada f'_c (MPa)	Resistencia media requerida f'_{cr} (MPa)
< 21	$f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f' + 8.5$
> 35	$1.10f'_c + 5.0$

Donde:

f'_c Resistencia especificada a la compresión del Hormigón (MPa)

Nota: Tomado de la *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 32)*

2.5.3 Pruebas de resistencia en probetas

La NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC (2015, p. 94) indica que las probetas que se utilizarán para aceptación del hormigón serán ensayadas a la edad de 28 días siguiendo las especificaciones de la NTE INEN 1573 o ASTM C39 para probetas cilíndricas .

CAPITULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se explicará el desarrollo del diseño experimental de mezcla de hormigón para la obtención de probetas de hormigón utilizando metacaolín en los porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% como reemplazo parcial del cemento para obtener una resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm².

Se indicará las características de los materiales utilizados en el proceso de la elaboración de los especímenes de hormigón, también los ensayos que se han utilizado para la fabricación de los testigos cilíndricos, así como también los ensayos físicos y mecánicos ejecutados al hormigón tanto en su estado fresco como en estado endurecido a 7, 14, 21 y 28 días de curado.

3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 Tipo

Lozada (2014, p. 34) considera que la investigación aplicada busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo lo cual representa una oportunidad de progreso para el sector productivo del país si se logra concretar colaboraciones de mutuo beneficio.

3.1.2 Nivel

Cauas (2015, p. 10) indica que el nivel es el grado de profundidad con la que se estudia ciertos fenómenos dentro de una investigación; el nivel explicativo o causal para algunos este nivel se identifica con los estudios de comprobación de hipótesis causales sin embargo para nosotros este nivel tiene finalidades principales como explicar la causa de un fenómeno e insertar el fenómeno en un contexto teórico, de modo que permita incluirlo en una determinada generalización.

Eliseo (2021) menciona que el nivel explicativo trata de explicar las causas por las cuales ocurren determinadas situaciones, hechos o fenómenos, además se encontrará la descripción de las variables de un fenómeno, así como el análisis de la relación que existe entre ellas.

3.2 MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1 Método

Este trabajo de investigación se realizará mediante el método hipotético deductivo de acuerdo con Bastis Consultores (2021) indica que se trata de una teoría sobre el funcionamiento de las cosas y deriva de ella hipótesis comprobables; es una forma de razonamiento deductivo, ya que se mueve de principios generales, suposiciones e ideas a declaraciones más específicas sobre cómo se ve y funciona el mundo. Luego, la hipótesis se prueba mediante la recopilación y el análisis de datos, y los resultados confirman o refutan la teoría.

3.2.2 Enfoque

El enfoque de esta investigación es cuantitativo lo cual Pinto y Maldonado (2018, p. 35) indica que en el enfoque cuantitativo se utiliza la recolección, análisis e interpretación de los datos para dar respuestas a las preguntas de investigación o probar las hipótesis previamente establecidas; además de ser deductivo, objetivo, medible y comprobable.

3.2.3 Diseño

Para este trabajo de investigación se utilizará el diseño experimental que de acuerdo con Arias y Covinos (2021, p. 73) definen al diseño experimental como un proceso cuyo principal objetivo es verificar cuantitativamente la causalidad de una variable sobre otra; en el diseño experimental la variable independiente representa el tratamiento, factor, condiciones o intervención que el investigador manipula y/o controla para probar los efectos sobre la variable dependiente.

a) **Diseño experimental.** El diseño experimental se llevó a cabo en base al uso del metacaolín en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% como sustitución parcial del cemento de uso general Tipo GU en función de su peso para obtener una mejora en su propiedad mecánica como lo es la resistencia a la compresión del hormigón convencional de 210 kg/cm² en la provincia de Santa Elena.

Se elaboraron 60 probetas de concreto empleando cemento de uso general (Holcim – GU), se realizó la dosificación de 210 kg/cm² como resistencia base para realizar los ensayos de compresión, y se empleó metacaolín en 5%, 10%, 15% y 20% como sustituto del cemento en función a su peso. A continuación, se definen las siglas de los materiales utilizados junto a su porcentaje en la elaboración de las probetas ensayadas en este trabajo.

Tabla 14

Tipo de hormigón y su porcentaje de metacaolín.

	Tipo de Hormigón	C	MK
1	MK0%	100%	0%
2	MK5%	95%	5%
3	MK10%	90%	10%
4	MK15%	85%	15%
5	MK20%	80%	20%

Nota: Cemento GU (C) y Metacaolín (MK)

b) **Metodología del diseño.**

- ✓ Elección de los agregados gruesos y finos a utilizar en las probetas de concreto.
- ✓ Ensayos a los agregados gruesos y finos: peso volumétrico, granulometría, porcentaje de absorción y contenido de humedad.
- ✓ Elaboración de la mezcla de hormigón según su dosificación por medio del método ACI 211.1 y reemplazo del cemento por metacaolín.
- ✓ Evaluación de las propiedades del hormigón con los siguientes ensayos:

– Asentamiento o Revenimiento con el cono de Abrams – NTE INEN 1578.

– Resistencia a la compresión a 7, 14, 21 y 28 días – NTE INEN 1573

3.3 METODOLOGÍA DEL O.E1: DISEÑAR DIVERSAS DOSIFICACIONES DE HORMIGÓN CON VARIOS PORCENTAJES DE METACAOLÍN (5%, 10%, 15% Y 20%) COMO REEMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PARA OBTENER UNA RESISTENCIA MAYOR O IGUAL A 210 KG/CM²

El diseño de diversas dosificaciones de hormigón se debe efectuar mediante el método ACI 211.1 y el reemplazo de los porcentajes de metacaolín de 5%, 10% 15% y 20% en base a la norma ASTM C331-07 donde menciona que es necesario realizar mezclas de prueba para obtener una resistencia adecuada utilizando porcentajes a partir del 2%.

Para el diseño de las dosificaciones se deben seleccionar los agregados gruesos y finos a utilizar en las probetas de hormigón lo cual se selecciona una muestra de agregado grueso #56 (con Tamaño máximo nominal de 1" (25.4mm)) proveniente de la cantera Calizas Huayco S.A de la ciudad de Guayaquil, y el agregado fino que corresponde a la arena extraída del cantón Milagro.

A los agregados seleccionados se deben realizar ensayos de “Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) en condición suelta o compactada” – NTE INEN 858, “Análisis granulométrico” - NTE INEN 696, “Determinación de la absorción y densidad de los agregados gruesos” – NTE INEN 857 y para los agregados finos – NTE INEN 856 y “Determinación del contenido de humedad total” – NTE INEN 862 los cuales se detallan en la sección 3.8 donde estos agregados cumplen con las especificaciones.

3.4 METODOLOGÍA DEL O.E2: REALIZAR UN DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN CON UNA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA QUE ALCANCE UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE $f'c = 210 \text{ KG/CM}^2$ PARA EL CONCRETO PATRÓN

El diseño de mezcla de hormigón para una dosificación óptima del concreto patrón se debe efectuar mediante el método ACI 211.1; para lo cual se deben seleccionar los agregados gruesos y finos a utilizar en las probetas de hormigón lo cual se selecciona una muestra de agregado grueso #56 (con Tamaño máximo nominal de 1" (25.4mm)) proveniente de la cantera Calizas Huayco S.A de la ciudad de Guayaquil, y el agregado fino que corresponde a la arena extraída del cantón Milagro.

A los agregados seleccionados se deben realizar ensayos de “Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) en condición suelta o compactada” – NTE INEN 858, “Análisis granulométrico” - NTE INEN 696, “Determinación de la absorción y densidad de los agregados gruesos” – NTE INEN 857 y para los agregados finos – NTE INEN 856 y “Determinación del contenido de humedad total” – NTE INEN 862 los cuales se detallan en la sección 3.8 donde estos agregados cumplen con las especificaciones.

3.5 METODOLOGÍA DEL O.E3: REALIZAR UN ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN ENTRE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN PATRÓN Y LAS PROBETAS DE HORMIGÓN CON LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE METACAOLÍN (5%, 10%, 15% Y 20%), DANDO A CONOCER LA DOSIFICACIÓN ADECUADA USANDO METACAOLÍN

Para cumplir este objetivo específico se deben realizar los ensayos a compresión a 7, 14, 21 y 28 días de acuerdo con las especificaciones NTE INEN 1573 a los

especímenes con varios porcentajes (5%, 10%, 15% y 20%) y a al espécimen patrón, de acuerdo con la especificación antes mencionada indica que los ensayos a compresión deben realizarse con especímenes curados en húmedo tan pronto como sea posible luego de extraerlos de la piscina de curado como se detalla en la sección 3.12.

3.6 POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.6.1 Población

Condori (2020, p. 2) define a la población como elementos accesibles o unidad de análisis que pertenece al ámbito especial donde se desarrolla el estudio. Para Arias y Covinos (2021, p. 113) la población es un conjunto infinito o finito de sujetos con características similares entre sí. En esta investigación las poblaciones seleccionadas son la cantera Calizas Huayco S.A de la ciudad de Guayaquil y el cantón Milagro.

3.6.2 Muestra

Condori (2020, p. 2) indica que la muestra es la parte representativa de la población que es importante saber delimitar correctamente de acuerdo al proyecto de investigación, con las mismas características generales de la población. Para Hernández et. al (2017, p. 175) la muestra es un subgrupo de la población, las muestras deben ser representativas. En este trabajo de investigación escogimos una muestra de agregado grueso #56 (con Tamaño máximo nominal de 1" (25.4mm)) proveniente de la cantera Calizas Huayco S.A de la ciudad de Guayaquil, y el agregado fino que corresponde a la arena extraída del cantón Milagro.

3.6.3 Muestreo

Arias y Covinos (2021) define al muestreo como una técnica para el estudio de la muestra, al aplicar esta técnica hallaremos las muestras representativas con base a criterios y formulas aplicadas.

3.7 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 15

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable independiente Porcentajes de metacaolín con relación al peso del cemento.	El metacaolín demuestra que es una puzolana que mejora la trabajabilidad, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión y durabilidad a largo plazo es decir resistencia al ataque de sulfato y alca sílice (Mansour y Al Biajawi, 2022)	El metacaolín debe cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C618 y para la determinación del porcentaje con la norma ASTM C331.	Tipo de puzolana	Metacaolín	% en peso
Variable dependiente Resistencia a la compresión mayor a 210 kg/cm ²	Es la principal propiedad mecánica del hormigón, se define como la capacidad de soportar un material bajo una carga de aplastamiento.	Se determina mediante los ensayos en el laboratorio siguiendo los requerimientos de la Norma Ecuatoriana INEN 858, INEN 696, INEN 856, INEN 862. Para el diseño de la mezcla de hormigón siguiendo los requerimientos del método ACI 211.1	Resistencia del concreto Mezcla de concreto Componentes del concreto	Compresión Dosificación Agregado fino Agregado grueso Agua Cemento	Kg/cm ² Kg Kg Kg Lt Kg

3.8 EJECUCIÓN, ELABORACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

3.8.1 Agregados gruesos y finos

Los agregados usados para la elaboración de las probetas de hormigón fueron de dos tipos; el agregado grueso #56 (con Tamaño máximo nominal de 1" (25.4mm)) proveniente de la cantera Calizas Huayco S.A de la ciudad de Guayaquil, y el agregado fino que corresponde a la arena extraída del cantón Milagro.

Los ensayos que se realizaron a los agregados grueso y fino son:

- ✓ Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) en condición suelta o compactada – NTE INEN 858.
- ✓ Análisis granulométrico - NTE INEN 696.
- ✓ Determinación de la absorción y densidad de los agregados gruesos – NTE INEN 857 y para los agregados finos – NTE INEN 856.
- ✓ Determinación del contenido de humedad total – NTE INEN 862.

a) Determinación de la masa unitaria suelta y compactada – NTE INEN 858. Este método se usa de manera muy frecuente para determinar la masa unitaria (peso volumétrico) del árido, en condición suelta o compactada y calcular los vacíos entre las partículas en los áridos finos, gruesos o en una mezcla de ambos, basándose en la misma determinación.

Para realizar el ensayo de determinación de masa unitaria suelta se deben usar los siguientes equipos y seguir el procedimiento detallado a continuación según las especificaciones NTE INEN 858:

- ✓ Balanza: Que tenga una precisión de 0,1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso, con graduaciones de al menos 0,05 kg. Se debe considerar que el rango de uso de la balanza se extiende desde

la masa del molde vacío, hasta la masa del molde con contenido el cual se considera posee una masa unitaria de 1.920 kg/m^3 .

- ✓ Varilla de compactación: Debe ser una varilla de acero lisa y recta de 16 mm de diámetro y tener una longitud de aproximadamente 600 mm, teniendo el extremo de compactación o los dos extremos redondeados con punta semiesférica, cuyo diámetro debe de ser de 16 mm.
- ✓ Molde: Un recipiente de metal con forma cilíndrica, preferiblemente provisto de asas para agarre. Impermeable, con la parte superior y el fondo, rectos y uniformes. Debe ser lo suficientemente rígido para mantener su forma bajo condiciones de uso agresivas. El molde debe tener una altura aproximada o igual a su diámetro, pero en ningún caso la altura debe ser menor al 80% ni superior al 150% del diámetro.
- ✓ Pala o cucharón: Con tamaño conveniente para llenar el molde con el árido grueso que se está ensayando.
- ✓ Equipo de calibración: Además de la balanza.
 - Placa de vidrio: Con mínimo 6 mm de espesor y al menos 25 mm mayor que el diámetro del molde a ser calibrado.
 - Grasa: Grasa liviana automotriz o similar.
 - Termómetro: Con un rango entre $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y $32 \text{ }^\circ\text{C}$ y que permita una lectura de por lo menos $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.
- ✓ El tamaño de la muestra abarca aproximadamente 125 % a 200 % respecto a la cantidad necesaria para llenar el molde y debe ser manipulada de tal manera que se evite la segregación. Se procede a secar la muestra del árido grueso hasta obtener masa constante, de preferencia en un horno con la capacidad adecuada, que este graduado y la temperatura se mantenga constante a $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

- ✓ Para la masa unitaria suelta se debe llenar el molde hasta rebosar con la ayuda de una pala o cucharón, colocar el árido desde una altura no mayor a 50 mm por encima del molde. Tener cuidado para prevenir la segregación de las partículas que componen la muestra. Enrasar la superficie del árido con los dedos o con ayuda una regla, de tal manera que las partículas grandes del árido grueso equilibren los vacíos mayores en la superficie que están por debajo de la parte superior del molde.
- ✓ Determinar la masa del molde, así como también la masa del molde con su contenido. Registrar los valores obtenidos con una aproximación de 0,05 kg.

Para realizar el ensayo de determinación de masa unitaria compactada suelta se debe seguir el procedimiento detallado a continuación según las especificaciones NTE INEN 858:

- ✓ Se llena la tercera parte del molde y se nivela la superficie con los dedos. Se compacta la capa, con 25 golpes de la varilla de compactación, los golpes deben ser distribuidos de manera uniformemente sobre la superficie. A continuación, se llenan los dos tercios del molde, y nuevamente se nivela y compacta de la forma indicada en el paso anterior. Se llena el molde a rebosar y se compacta nuevamente. Se nivela la superficie del árido con los dedos o una la ayuda de una regla, de tal manera que cualquier ligera proyección de las partículas grandes del árido grueso, equilibren los vacíos mayores en la superficie que están por debajo de la parte superior del molde.
- ✓ En la compactación de la primera capa, no golpear la varilla fuertemente con el fondo del molde. La compactación de la segunda y tercera capa debe ser cuidadosa evitando que la varilla de compactación penetre la capa anterior del árido.
- ✓ Determinar la masa del molde, así como también la masa del molde más su contenido. Se registran los valores obtenidos con una aproximación de 0,05 kg.

b) **Análisis granulométrico - NTE INEN 696.** Esta norma establece el método de ensayo para determinar la distribución granulométrica de las partículas de áridos, grueso y fino, por tamizado. Este método de ensayo es utilizado para determinar la graduación de materiales con el propósito de utilizarlos como áridos para mezclas de hormigón.

Figura 1
Tamizado de agregados



Figura 2
Peso del agregado grueso retenido en cada tamiz



Para realizar el ensayo de determinación de análisis granulométrico se deben usar los siguientes equipos y seguir el procedimiento detallado a continuación según las especificaciones NTE INEN 696:

- ✓ Balanzas. - Las balanzas a utilizar en el ensayo del árido fino y árido grueso deben tener una exactitud y legibilidad tal como se indica a continuación:
 - Para árido fino, tiene que ser legible hasta 0,1 g y poseer una precisión de 0,1 g o el 0,1% de la carga de ensayo, el que sea mayor, en cualquier punto, dentro del rango de uso.
 - Para árido grueso o para mezclas de áridos finos y gruesos, tiene que ser legible y poseer una precisión de 0,5 g o 0,1% de la carga del ensayo.
- ✓ Tamices. - La malla del tamiz debe estar ensamblada sobre marcos cuya construcción no permita pérdidas de material durante el proceso de

tamizado. La maya y los marcos del tamiz normalizado deben cumplir los requisitos de la NTE INEN 154. Los marcos de tamiz no normalizados deben cumplir los requisitos de la NTE INEN 154 para que se apliquen.

- ✓ Agitador de tamices mecánico. – Es una máquina que debe crear movimientos y vibraciones en los tamices donde las partículas rebotan y caen, u otro tipo de movimiento que tenga diferente orientación a la superficie de tamizado.

- ✓ Horno. - Un horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

- ✓ Se procede a secar la muestra en un horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 24 horas.

- ✓ Se selecciona los tamices necesarios que sean adecuados y que cubran los tamaños de las partículas del material que va a ensayarse, con el propósito de obtener los requerimientos que están en las especificaciones. Utilizar los tamices que sean necesarios para obtener el módulo de finura o para regular la cantidad de material sobre un tamiz. Ordenar los tamices en forma descendente según el tamaño de las aberturas. Agitar los tamices de manera manual o con la ayuda de una tamizadora mecánica.

- ✓ Se coloca una cantidad de material sobre el tamiz superior, no colocar demasiado material con la finalidad de que todas las partículas tengan oportunidad de llegar a las aberturas de los tamices inferiores durante la operación de tamizado. En ningún caso la cantidad retenida debe ser tan grande como para causar obstrucciones y deformación permanente en la tela o malla del tamiz.

- ✓ Evitar el exceso de material en los tamices individuales para el caso de mezclas de áridos grueso y fino; si se utiliza un agitador mecánico, tamizar a mano las partículas que sean mayores a 75 mm mediante la determinación de la abertura más pequeña de tamiz por la cual puede pasar cada partícula.

- ✓ Determinar las masas del material retenido en cada tamiz con una balanza que cumpla con los requerimientos especificados, que tenga una precisión de 0,1% de la masa total de la muestra seca original. La masa total del material después de ser tamizada debe ser similar a la masa original de la muestra colocada sobre los tamices. Si las cantidades difieren en más del 0,3%, respecto a la masa de la muestra seca original, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.
- ✓ Elaborar la curva granulométrica respectiva con los datos de las masas obtenidas en el proceso del tamizado.

c) *Determinación de la absorción y densidad de los agregados*

Agregado Grueso - NTE INEN 857. Este método de ensayo se lo aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido grueso esto es sin incluir el volumen de vacíos que existe entre las partículas, la densidad relativa o gravedad específica y la absorción del árido.

Para realizar el ensayo de determinación de absorción y densidad del agregado grueso se deben usar los siguientes equipos y seguir el procedimiento detallado a continuación según las especificaciones NTE INEN 857:

- ✓ Balanza: Equipo para determinar masa, que sea sensible y legible, con una aproximación de 0,05% de la masa de la muestra en cualquier punto dentro del rango de uso para este ensayo, o también 0,5 g, la que sea mayor de las dos. La balanza debe estar equipada con un dispositivo que sea apropiado para poder suspender el recipiente para la muestra en el agua, desde el centro de la plataforma o recipiente de la balanza.
- ✓ Recipiente para la muestra: Debe ser una canasta de alambre con una abertura de 3,35 mm o de malla más fina, o un cubo de ancho y altura aproximadamente iguales, debe tener una capacidad de 4 a 7 litros para los

áridos gruesos que tengan un tamaño máximo nominal de 37,5 mm o menor, según sea necesario.

- ✓ Tanque de agua: Tanque hermético, dentro del cual se colocara el recipiente para la muestra mientras se suspende bajo la balanza.
- ✓ Tamices: Tamices de varios tamaños de acuerdo a la norma NTE INEN 154.
- ✓ Horno: De tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme y constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ✓ El procedimiento para determinar absorción y densidad; secar la muestra en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Enfriar la muestra al aire a temperatura ambiente en un intervalo de 1 hora a 3 horas para muestras de tamaño máximo nominal de hasta 37,5 mm o por más tiempo para tamaños más grandes, hasta que el árido se haya enfriado a una temperatura que sea manipulada; seguidamente sumergir el árido en agua a temperatura ambiente por un período de $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$.
- ✓ Cuando se utilizan los valores de absorción y densidad relativa o gravedad específica en el diseño de mezclas de hormigón, en la cual el árido estará en condición de humedad natural; el requisito anterior es opcional y si la superficie de las partículas de la muestra ha sido conservada húmeda de manera continua hasta el ensayo, el requisito del numeral anterior también es opcional.
- ✓ Retirar la muestra del agua, luego colocarla sobre un paño absorbente y con el mismo paño frotar hasta eliminar el exceso de agua del agregado grueso. Secar las partículas grandes de manera individual. Se puede utilizar una corriente de aire para acelerar la operación de secado. Evitar la evaporación o pérdida de agua desde los poros del agregado grueso durante el secado superficial. Determinar la masa del árido grueso en condición saturada superficialmente seca.

- ✓ Luego de determinar la masa en aire, se procede a colocar la muestra de ensayo saturada superficialmente seca en el recipiente para la muestra y determinar la masa aparente en agua a una temperatura de $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Se procede a remover el aire atrapado antes de determinar la masa por medio de la agitación del recipiente mientras se lo va sumergiendo.
- ✓ Secar la muestra del agregado en el horno a una temperatura constante de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Enfriar la muestra del agregado grueso a temperatura ambiente, durante 1 hora a 3 horas o hasta que el árido grueso se haya enfriado a una temperatura que sea adecuada para él y luego determinar su masa.

Figura 3

Eliminación del exceso de agua del agregado grueso para el ensayo de D.S.S.S



Figura 4

Toma de pesos de la canastilla y material más la canastilla para la D.S.S.S



Agregado fino - NTE INEN 856. Este método de ensayo se lo aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido fino esto es sin incluir el volumen de vacíos que existe entre las partículas, la densidad relativa o gravedad específica y la absorción del árido.

Para realizar el ensayo de determinación de absorción y densidad del agregado fino se deben usar los siguientes equipos y seguir el procedimiento detallado a continuación según las especificaciones NTE INEN 856:

- ✓ Balanza: Equipo para determinar masa, que sea sensible y legible, con una aproximación de 0,05% de la masa de la muestra del agregado fino en cualquier punto dentro del rango de uso para este ensayo, o también 0,5 g, la que sea mayor de las dos. La balanza debe estar equipada con un dispositivo que sea apropiado para poder suspender el recipiente para la muestra en el agua, desde el centro de la plataforma o recipiente de la balanza.

- ✓ Picnómetro: Puede ser un matraz u otro recipiente que sea adecuado para realizar el ensayo, en el cual la muestra de árido fino pueda ser introducida de manera fácil y el volumen contenido pueda ser legible dentro de un rango de $\pm 0,1 \text{ cm}^3$. El volumen del contenedor lleno hasta la marca debe ser por lo menos 50% mayor que el requerido para acomodar la muestra de ensayo. Para una muestra de 500 g del árido fino, es adecuado utilizar un matraz o un recipiente que tenga una capacidad de 500 cm^3 , con un picnómetro adaptado en la parte superior.

- ✓ Molde y compactador para ensayo de humedad superficial: El molde debe tener la forma de un cono truncado y debe ser metálico, además debe poseer las siguientes dimensiones: $40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de diámetro interno superior, $90 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de diámetro interno en la base y $75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de altura; el espesor del metal debe tener mínimo 0,8 mm. El compactador metálico debe tener una cara compactadora circular y plana, de $25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de diámetro, y una masa de $340 \text{ g} \pm 15 \text{ g}$.

- ✓ Horno: De tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme y constante de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

- ✓ Procedemos a colocar la muestra en un recipiente adecuado y secarla en el horno a una temperatura constante de $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, dejarla que se enfríe al ambiente hasta que tenga una temperatura que sea adecuada para su manipulación, luego cubrirla con agua, por inmersión o por adición de agua, hasta alcanzar al mínimo un 6% de humedad en el árido fino, luego dejar que repose por $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$.

- ✓ Eliminar el exceso de agua, evitando la pérdida de material fino, esparcir la muestra sobre una superficie plana que no sea absorbente, expuesta a una corriente leve de aire y moverla de manera frecuente para asegurar que el secado sea homogéneo. Realizar el primer ensayo empleando el cono truncado para determinar si existe agua superficial en la muestra. Si aun posee agua superficial se debe continuar secando hasta que el ensayo del cono truncado indique que la muestra ha alcanzado la condición de superficie seca. Si en el primer ensayo se determina que la humedad superficial no está presente, significa que se ha secado demasiado la muestra; en este caso, mezclar el árido fino con algunos cm³ de agua y dejar reposar en un recipiente cubierto por al menos 30 minutos. A continuación, retomar el proceso de secado y ensayos de cono truncado de manera frecuente hasta determinar el inicio de la condición de superficie seca.

- ✓ Ensayo para determinar la humedad superficial. Se debe mantener de manera firme el molde sobre una superficie lisa que no sea absorbente, con el diámetro mayor hacia abajo. Colocar una porción del árido fino parcialmente seco en el molde en forma suelta, hasta llenarlo, colocando material adicional en la parte superior manteniendo de manera firme el molde, compactar el árido fino con 25 golpes de manera ligera con el compactador. Cada caída se debe iniciar a 5 mm aproximadamente sobre la superficie del árido. Permitir que el compactador caiga de manera libre bajo la atracción de la gravedad en cada golpe. Remover el material que ha caído alrededor de la base y levantar el molde de manera vertical. Si la humedad superficial aún está presente, el árido fino mantendrá la forma del molde. Cuando el árido fino se desmorona de manera ligera, esto indica que se ha alcanzado la condición de superficie seca.

- ✓ Existen áridos finos que tienen partículas de forma angular predominantemente o que tienen una alta proporción de finos, pueden no desmoronarse en el ensayo del cono a pesar de alcanzar la condición de superficie seca. Esto se puede verificar si al dejar caer desde una altura de 100 mm a 150 mm sobre una superficie, un puñado de árido fino tomado de la muestra ensayada, pueden observarse partículas individuales muy finas.

Para estos materiales, se considera que han alcanzado la condición saturada superficialmente seca cuando luego de remover el molde, un lado del árido fino se derrumba.

- ✓ Para el procedimiento gravimétrico se llena el picnómetro parcialmente con agua. Introducimos en el picnómetro 500 g \pm 10 g de árido fino saturado superficialmente seco, y llenamos con agua adicional hasta aproximadamente el 90% de la capacidad. Agitamos el picnómetro manualmente o mecánicamente.
 - Manualmente: invertir, rodar, y agitar el picnómetro para eliminar las burbujas de aire visibles.
 - Mecánicamente: agitar el picnómetro mediante una vibración externa, de una forma que la muestra no se degrade. Para la eliminación de aire sin degradación, es suficiente un nivel de agitación ajustado para mantener las partículas individuales en movimiento. Se considera aceptable un agitador mecánico, si en ensayos de comparación para cada período de seis meses de uso, muestra variaciones menores que el rango aceptable de dos resultados, respecto a los resultados de la agitación manual con el mismo material.
- ✓ Después de eliminar todas las burbujas de aire atrapadas, se debe ajustar la temperatura del picnómetro y su contenido a 23,0 °C \pm 2,0 °C, si es necesario mediante inmersión parcial en agua circulante; y llevar el agua en el picnómetro hasta la marca de calibración. Determinar la masa total del picnómetro, de la muestra y del agua. Retiramos el árido fino del picnómetro, secarlo en el horno a una temperatura constante de 110 °C \pm 5 °C, y enfriarlo a temperatura ambiente por 1 h \pm ½ h, por último determinar su masa.
- ✓ Determinar la masa del picnómetro lleno hasta la marca de calibración, con agua a 23,0 °C \pm 2,0 °C.

Figura 5

Secado al aire libre para eliminar exceso de agua en el agregado fino



Figura 6

Ensayo de cono para determinar el estado S.S.S del agregado fino



Figura 7

Agregado fino en estado S.S.S



Figura 8

Ensayo de D.S.S.S



d) Determinación del contenido total de humedad - NTE INEN 862.

Este método de ensayo sirve para determinar el porcentaje de humedad que puede evaporarse por secado en una muestra de áridos, tanto el correspondiente a la humedad superficial, como la humedad contenida en los poros del árido.

Para realizar el ensayo de determinación del contenido total de humedad del agregado grueso y fino se deben usar los siguientes equipos y seguir el procedimiento detallado a continuación según las especificaciones NTE INEN 862:

- ✓ Horno. - Un horno que pueda mantener la temperatura, a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- ✓ Balanza. - Una balanza precisa, legible y con sensibilidad de 0,1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso. Dentro de un intervalo igual al 10% de la capacidad de la balanza que se utiliza para determinar la masa, la indicación de carga debe tener una precisión de 0,1% de la diferencia entre las masas.
- ✓ Recipiente para la muestra. - Un recipiente de material resistente al calor, de volumen suficiente para contener la muestra sin peligro de derrame.
- ✓ Agitador. – Puede ser una espátula o cuchara de metal con un tamaño conveniente.
- ✓ Procedimiento para determinar la masa de la muestra en una balanza con una aproximación de 0,1%.
- ✓ Secar la muestra completamente en el recipiente por medio del horno por 24h, evitar la pérdida de partículas.
- ✓ La muestra está completamente seca cuando un mayor tiempo de calor puede ocasionar, una pérdida adicional de la masa menor al 0,1%.
- ✓ Determinar la masa de la muestra seca, en una balanza con una aproximación de 0,1%, luego de que se haya enfriado lo suficiente para evitar daños en la balanza.

Figura 9

Muestra de agregado fino



Figura 10

Muestra de agregado grueso



Figura 11
Muestra de agregado fino en horno por 24h



Figura 12
Muestra de agregado grueso en horno por 24h



3.8.2 *Cemento*

El cemento es un agregado muy importante en este trabajo de investigación, el cemento del tipo especificado debe cumplir con todos los requisitos físicos normalizados, se trabajó con el cemento HOLCIM GU ya que este cemento cumple con las especificaciones de la norma NTE INEN 2380.

A continuación, en la Tabla 16 se muestra el análisis químico del cemento.

Tabla 16
Análisis químico del cemento

	Cemento Holcim	RTCR 479:2015	ASTM C1157 GU
% Óxido de magnesio (MgO)	≤ 3.0	≤ 6.0	≤ 6.0
% Trióxido de azufre (SO3)	≤ 3.0	≤ 4.0	≤ 4.0

Nota: Tomado de *Holcim (2015)*

El cemento Holcim GU es obtenido por la molienda conjunta y uniforme de Clinker y minerales naturales como caliza de alta ley que le da plasticidad en estado fresco a la mezcla; puzolana que genera una mezcla más densa con mayor

durabilidad en distintas proporciones en peso del cemento como se indica en la siguiente Tabla 17.

Tabla 17
Composición del cemento

	Cemento Holcim	RTCR 479:2015
Clinker	45-64	45-64
Adiciones minerales	36-55	36-55
Otros	0-5	0-5

Nota: Tomado de *Holcim (2015)*

Según los análisis físicos del cemento mostrados en la siguiente Tabla 18, el cemento Holcim Fuerte cumple con el Reglamento Técnico RCTR 479:2015 como cemento tipo MM/C (C-P)-28, de igual forma puede llegar a cumplir con las especificaciones de desempeño para cemento hidráulico ASTM C1157 en este caso el cemento tipo GU.

Tabla 18
Análisis físicos del cemento

	Cemento Holcim Fuerte	RTCR 479:2015	ASTM C1157 GU
Contenido de aire, ASTM C185(máx.%)	12.0	12.0	12.0
Finura (superficie específica) ASTM C204(min.cm³/g)	-	-	-
Finura retenida malla 0,045 mm (No.325) ASTM C 430(máx.%)	-	-	-
Resistencia a la compresión			
3 días	13	13	13
7 días	20	20	20
ASTM C109 (min. MPa)			
28 días	28	28	28
Fraguado Vicat.			
Inicial (máx., min)	45	45	45
Final (Max, min)	420	420	420
Cambio a la autoclave, ASTM C151			
Expansión(máx.%)	0.8	0.8	0.8
Contracción(máx.%)	0.8	-	0.8
Expansión en barras de mortero 14 días, %máximo.	0.02	0.02	-
Falso Fraguado, % mínimo	50	50	-

Nota: Tomado de *Holcim (2015)*

La puzolana Holcim tiene origen volcánico con un alto contenido de sílice como se muestra en la Tabla 19, lo cual es ideal para que se pueda producir la reacción puzolánica en donde la sílice reacciona con la cal, formando silicatos lo cual desarrolla las resistencias.

Tabla 19
Requisitos de componentes minerales

	Puzolana Holcim	Requisitos según ASTM C618
Contenido de minerales reactivos (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) mínimo%.	80	70
% Trióxido de azufre (So₃) máximo%	2	4
Contenido de humedad (máximo %)	2	3
Pérdida de la ignición (máximo%)	10	10
Índice de actividad a 7 o 28 días (mínimo%)	75	75

Nota: Tomado de *Holcim (2015)*

3.8.3 Metacaolín

El metacaolín es un aluminosilicato activado térmicamente y es considerando un material cementante suplementario, proviene de la calcinación del caolín o caolinita a temperaturas entre 500 °C y 900 °C, el tamaño de la partícula del metacaolín ronda entre 0.5 µm y 20 µm. A continuación, en la Tabla 20 se indica la composición química del metacaolín junto a otros materiales cementantes y en la Tabla 21 se indica las características de KaMin® 70C, metacaolín de uso industrial proveniente de USA usado en este trabajo de investigación:

Tabla 20
Análisis químico del metacaolín y otros cementantes

Material	SiO₂ %	Al₂O₃ %	Fe₂O₃ %	CaO %
Metacaolín	49.55 - 73.53	23.11 - 45.29	0.57 - 4.32	0.00 - 2.71
Humo de Sílice	96.00	0.30	0.20	0.03
Polvo de Perlita	76.89	10.51	2.48	0.12
Escorias de Alto Horno	32.71	15.75	1.38	42.11
Cenizas volantes	49.80 - 53.36	26.40 - 26.99	4.94 - 9.30	0.00 - 1.40
Cemento Blanco	15.60 - 22.90	4.14 - 4.89	0.21 - 0.29	67.40 - 74.10
Cemento gris	19.50 - 28.00	1.52 - 9.47	1.75 - 4.11	51.20 - 65.60

Nota: Tomado de *Restrepo et. al (2006, p. 133)*

Tabla 21
Características del KaMin R 70C

	Unidad	KaMin® 70C
Forma Física	-	Seca
Tamaño medio de partícula	µm	3.2
Brillo, % de reflectancia (TAPPI)	%	91
Gravedad específica	-	2.6
Absorción de aceite	g/100g	54
Densidad aparente	lb/ft ³	23

Nota: Tomado de *MINERALS (2008)*

3.8.4 Agua

El agua es un líquido fundamental para la elaboración de mezclas de hormigón debido a que colabora en gran medida con la resistencia, la misma debe considerar las normas ASTM C-1602. “Agua de mezcla para uso en la producción de hormigón de cemento hidráulico. Especificaciones”.

El agua potable y casi cualquier agua natural que se pueda beber y que no tenga sabor u olor, se pueden utilizar en la elaboración del hormigón.

3.9 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE HORMIGÓN

Los diseños de las mezclas fueron realizados en el LABORATORIO DE SUELOS, HORMIGONES Y ASFALTO en la UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA, cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, con la guía y ayuda del laboratorista de la carrera de Ingeniería Civil, se utilizó moldes cilíndricos de acero desmontables de 300 mm de altura x 150 mm de diámetro para los respectivos ensayos en los que se sustituyó cemento por metacaolín en distintos porcentajes.

Para la preparación de las mezclas primero se obtienen los pesos de cada agregado a utilizar para la resistencia de diseño establecido, este proceso se lo hace mediante

el uso de básculas de diferentes capacidades, en la Figura 12 se observa las proporciones a usar para realizar la mezcla de hormigón.

Como siguiente paso se deben colocar las proporciones de los materiales en la concretera, en este caso se usó una concretera de medio saco con 30 rpm, este procedimiento se repite para cada uno de los diseños de mezcla a realizar, es decir para la dosificación de control y para las dosificaciones con la sustitución de cemento por metacaolín en distintos porcentajes.

El procedimiento para realizar las mezclas es el siguiente: Primero se adiciona el agregado grueso, a continuación, se adiciona la mitad del agua junto al árido fino y después se coloca el cemento incluyendo el resto de agua. De manera progresiva la mezcladora realiza su función hasta lograr una mezcla homogénea como se puede observar en la Figura 14.

Figura 13
Proporciones de materiales para la mezcla.



Figura 14
Obtención de mezcla de hormigón



A continuación, se muestran las dosificaciones obtenidas de los diseños de hormigón utilizado en cada mezcla, diseñadas con el método del ACI-211.1 basado en tablas elaboradas mediante ensayos de los agregados lo cual nos permitió conocer los valores de los diferentes materiales, en la Tabla 22 se da a conocer los valores de dosificación para un hormigón de 210 kg/cm² tanto para un metro cúbico como para 12 probetas de hormigón con cada porcentaje de sustitución de metacaolín por cemento.

Tabla 22*Dosificación de hormigón de una $f'c$ 210 kg/cm²*

Material	1 m3	MK0%	MK5%	MK10%	MK15%	MK20%
Cemento						
GU	349.64	24.62	23.39	22.16	20.93	19.69
Metacaolín	0	0	1.23	2.46	3.69	4.92
Agua	183.27	12.90	12.90	12.90	12.90	12.90
A. Grueso	992.98	69.92	69.92	69.92	69.92	69.92
A. Fino	791.87	55.76	55.76	55.76	55.76	55.76

Los diferentes diseños de mezclas ejecutados se detallan a continuación:

- ✓ Primer diseño es la muestra patrón o de control con un porcentaje de sustitución de 0% del cemento por metacaolín (MK 0%).
- ✓ Segundo diseño corresponde a la mezcla con un porcentaje de sustitución de 5% del cemento por metacaolín (MK 5%).
- ✓ Tercer diseño corresponde a la mezcla con un porcentaje de sustitución de 10% del cemento por metacaolín (MK 10%).
- ✓ Cuarto diseño corresponde a la mezcla con un porcentaje de sustitución de 15% del cemento por metacaolín (MK 15%).
- ✓ Quinto diseño corresponde a la mezcla con un porcentaje de sustitución de 20% del cemento por metacaolín (MK 20%).

3.10 ENSAYO DE REVENIMIENTO DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

El ensayo de cono de Abrams fue realizado en el LABORATORIO DE SUELOS, HORMIGONES Y ASFALTO en la UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA, cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, con la guía y ayuda del laboratorista de la carrera de Ingeniería Civil siguiendo el procedimiento y especificaciones que están establecidas en la NTE INEN 1578 para los hormigones con cemento hidráulico.

Después de haber obtenido la mezcla homogénea se usa una parte de la muestra la cual se vierte en el cono Abrams, la muestra se vierte en tres capas, cada capa aproximadamente un tercio del volumen del cono Figura 15, a cada capa se le realiza 25 varilladas para conseguir una compactación adecuada, luego en la parte superior del cono se enrasa para eliminar los residuos y excedentes de mezcla, de inmediato levantar verticalmente el cono de forma cuidadosa hasta retirar el cono de manera completa, a continuación se procede a tomar la medida del asentamiento de la mezcla diseñada, Figura 16.

Figura 15
Ensayo de revenimiento



Figura 16
Medición de revenimiento



3.11 ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN

Para la elaboración y análisis de las probetas se emplearon moldes cilíndricos metálicos desmontables de 150mm x 300mm. Después de cada uso de los cilindros, se limpian y engrasan para realizar el vaciado de la mezcla las veces que se requiera. El hormigón se vacía de manera manual en 3 capas iguales, cada capa debe ser varillada con una varilla de acero con 25 golpes, también cada capa debe ser golpeada por el exterior del molde con un martillo de goma 10 veces para evitar vacíos dentro de la mezcla, y luego enrasar la superficie para eliminar mezcla excedente y residuos. Las probetas deben ser desencofradas en 24 horas después del vaciado.

Una vez desencofradas las probetas se les proporcionó una nomenclatura con la fecha de vaciado y el número o código de identificación, de manera inmediata se las sumergió en la piscina de curado, lugar en el cual permanecieron hasta la edad de rotura que fueron de 7, 14, 21 y 28 días.

Figura 17
Elaboración de cilindros



Figura 18
Enrasado de cilindros



Figura 19
Curado de probetas de hormigón



3.12 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Este ensayo es muy importante debido a que obtendremos los resultados de la investigación lo cual nos permitirá realizar el debido análisis, y se realiza siguiendo la normativa que plantea la norma NTE INEN 1573 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico”. La norma establece que mínimo se ensaye 2 probetas por edad para determinar la resistencia a la compresión, para el respectivo ensayo fabricamos 3 probetas cilíndricas de hormigón de 150mm x 300mm para cada tipo de mezclas y dosificación diseñada para ensayarlas a los 7, 14, 21 y 28 días. Todos los especímenes para una edad de ensayo dada deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisibles.

El ensayo a compresión se lo realizó en la prensa hidráulica del LABORATORIO DE SUELOS, HORMIGONES Y ASFALTO en la UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA, cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, previo a esto se obtiene las medidas de cada probeta como lo son el diámetro, altura y peso como en la Figura 23, se prepara la probeta y se la coloca en la prensa hidráulica la cual aplica una carga de manera continua y sin saltos bruscos, hasta que la probeta llegue de manera permisible a la rotura como se muestra en la Figura 21, cuando se ensaya con almohadillas no adherentes (neoprenos) puede ocurrir una fractura en la esquina; finalmente después de llegar a la rotura se adquieren los valores máximos de resistencias y la carga de rotura de cada probeta ensayada Figura 22.

Figura 20
Prensa hidráulica para ensayo de resistencia a compresión



Figura 21
Rotura de probetas



Figura 22
Toma de resultados



Figura 23
Toma de diámetros, altura y pesos de probetas.



CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos a los agregados fino y grueso, así como también los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas de hormigón con sustitución del cemento por metacaolín en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% a un hormigón convencional con dosificación de 210 kg/cm² y su respectiva muestra patrón o de control.

La finalidad de este capítulo es de analizar la propiedad mecánica de resistencia a la compresión de un diseño de hormigón típico con cemento Holcim de uso general (GU), sustituyendo en función del peso del cemento por metacaolín en distintos porcentajes.

4.1 RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO VOLUMÉTRICO SUELTO Y VARILLADO DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 858)

4.1.1 Peso volumétrico suelto del agregado grueso y fino

Los resultados de los ensayos de peso volumétrico suelto del agregado grueso se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Determinación de la masa unitaria suelta del agregado grueso

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B	0.0097	0.0097
Masa suelta de material contenida en B (kg): A	12.47	12.51
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Ms (kg/m ³)	1280.69	1284.80
Ms= 1282.75 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) suelta	Ms=A/B

Los resultados del ensayo de peso volumétrico suelto del agregado fino se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24

Determinación de la masa unitaria suelta del agregado fino

ÁRIDO FINO	Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B	0.0028	0.0028
Masa suelta de material contenida en B (kg): A	3.61	3.67
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Ms (kg/m ³)	1284.69	1306.05
Ms= 1295.37 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) suelta	Ms=A/B

4.1.2 Peso volumétrico varillado del agregado grueso

Los resultados del ensayo de peso volumétrico varillado del agregado grueso se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25

Determinación de la masa unitaria compactada del agregado grueso

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B	0.0097	0.0097
Masa suelta de material contenida en B (kg): A	14.53	14.57
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Mc (kg/m ³)	1492.27	1496.37
Mc= 1494.32 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) compactado	Mc=A/B

4.2 RESULTADOS DEL ENSAYO GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 696)

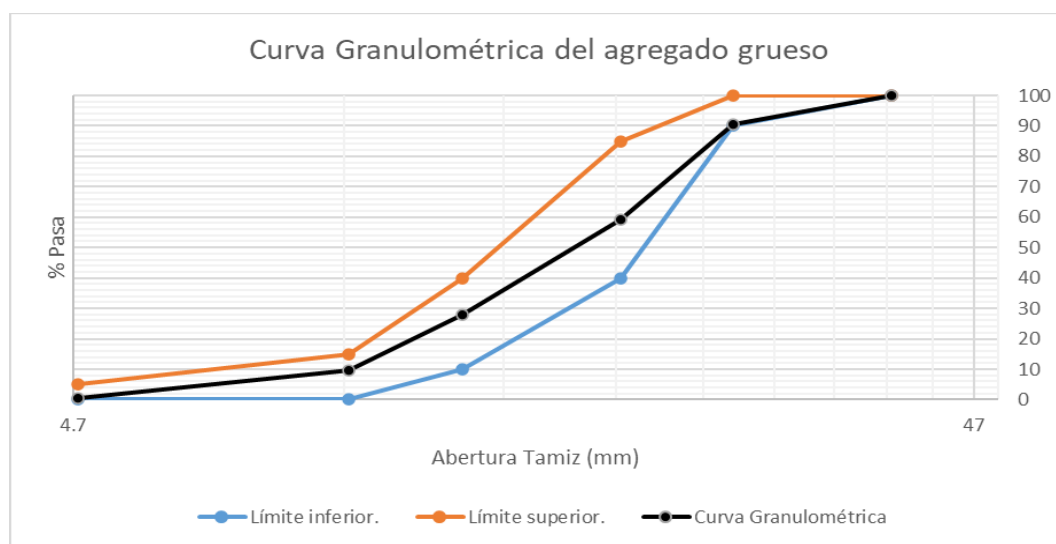
4.2.1 Granulometría del agregado grueso

Los resultados de los ensayos granulométricos son mostrados a continuación; en la Tabla 26 se presentan la distribución granulométrica del agregado grueso, en la Figura 23 se representa la curva de distribución granulométrica del agregado grueso.

Tabla 26
Análisis granulométrico del agregado grueso

Agregado Grueso					
Número de tamaño		56	Tamaño máximo nominal (mm)		25.4
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50.80	0	0	0	100
1 1/2"	38.10	0	0	0	100
1"	25.40	827	827	9.50	90.50
3/4"	19.05	2726	3553	40.82	59.18
1/2"	12.70	2720	6273	72.08	27.92
3/8"	9.50	1595	7868	90.40	9.60
N 4	4.75	805	8673	99.65	0.35
N 8	2.36	6.65	8689.65	99.73	0.27
N 16	1.18	0.52	8680.17	99.73	0.27
FONDO		23.24	8703.41	100	0
TOTAL		8703.41			
MF				3.59	

Figura 24
Curva granulométrica del agregado grueso



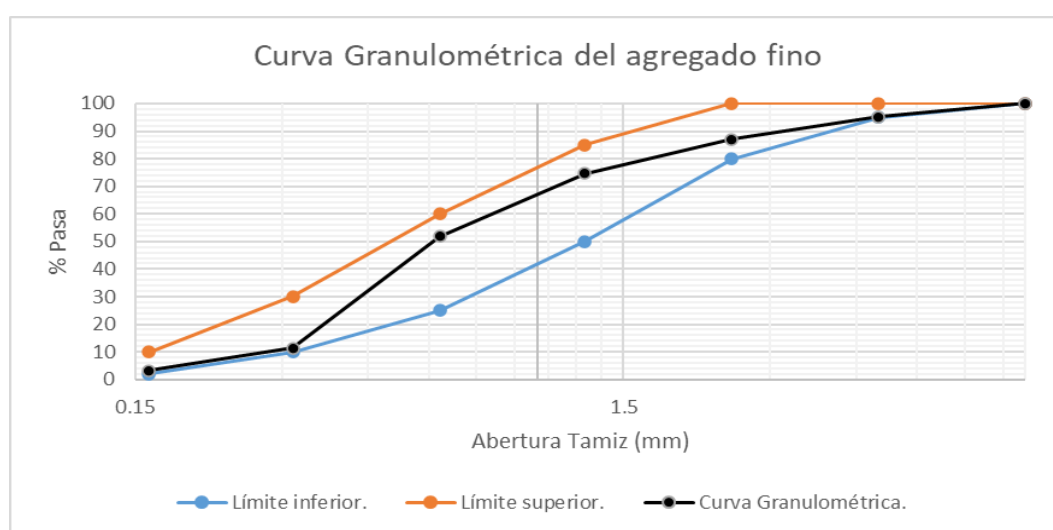
4.2.2 Granulometría del agregado fino

En la Tabla 27 tenemos los valores obtenidos de granulometría del agregado fino y en la Figura 25 encontramos la curva de distribución granulométrica del agregado fino.

Tabla 27
Análisis granulométrico del agregado fino

Agregado Fino					
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
3/8"	9.50	0	0	0	100
N 4	4.75	65.46	65.46	4.87	95.13
N 8	2.36	108.77	174.23	12.96	87.04
N 16	1.18	168.12	342.35	25.46	74.54
N 30	0.60	305.53	647.88	48.18	51.82
N 50	0.30	544	1191.88	88.63	11.37
N 100	0.15	108.53	1300.41	96.70	3.30
FONDO		44.38	1344.79	100	0
TOTAL					
				MF	2.77

Figura 25
Curva granulométrica del agregado fino



4.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (NTE INEN 857) Y AGREGADO FINO (NTE INEN 856)

4.3.1 Densidad y absorción del agregado grueso

Los resultados del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28*Determinación de densidad y porcentaje de absorción del árido grueso*

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1
Masa de la muestra en estado S.S.S (gr): B	2000
Masa de la muestra sumergida en agua (gr):C	1236
Masa de la muestra seca al horno (gr): A	1965.48
Densidad relativa (estado sss): D _{sss} (gr/cm ³)	2.62
Densidad relativa seca (estado seco): D _s (gr/cm ³)	2.57
Densidad relativa aparente: D (gr/cm ³)	2.69
Porcentaje de absorción: Pa (%)	1.76
Densidad relativa SSS (D _{sss})	$D_{sss}=B/(B-C)$
Densidad relativa seca (D _s)	$D_s=A/(B-C)$
Densidad relativa aparente (D)	$D=A/(A-C)$
Porcentaje de absorción (Pa)	$Pa=((B-A)/(A))*100$

4.3.2 Densidad y absorción del agregado fino

Los resultados del ensayo de densidad y absorción del agregado fino se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29*Determinación de densidad y porcentaje de absorción del árido fino*

ÁRIDO FINO	Muestra 1
Masa de la muestra seca al horno (gr): A	492.65
Masa del picnómetro llenado con agua hasta la marca de calibración (gr): B	663
Masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta la marca de calibración (gr): C	975
Masa de la muestra en estado sss (gr):S	500
Densidad relativa (estado sss): D _{sss} (gr/cm ³)	2.66
Densidad relativa seca (estado seco): D _s (gr/cm ³)	2.62
Densidad relativa aparente: D (gr/cm ³)	2.73
Porcentaje de absorción: Pa (%)	1.49
Densidad relativa SSS (D _{sss})	$D_{sss}=S/(B+S-C)$
Densidad relativa seca (D _s)	$D_s=A/(B+S-C)$
Densidad relativa aparente (D)	$D=A/(B+A-C)$
Porcentaje de absorción (Pa)	$Pa=((S-A)/(A))*100$

4.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 862)

4.4.1 Contenido de humedad del agregado grueso

Los resultados del ensayo de humedad del agregado grueso se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30

Determinación del contenido de humedad del árido grueso

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra húmeda (g): A	1000	1000
Masa de la muestra seca al horno (g): B	994	996
Humedad total (%): H	0.60	0.40
H= 0.50%	Humedad total	H=(A-B) /B*100

4.4.2 Contenido de humedad del agregado fino

Los resultados del ensayo de humedad del agregado fino se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31

Determinación de contenido de humedad del árido fino

ÁRIDO FINO	Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra húmeda (g): A	1400	1400
Masa de la muestra seca al horno (g): B	1339	1343
Humedad total (%): H	4.56	4.24
H= 4.40%	Humedad total	H=(A-B) /B*100

4.5 DOSIFICACIÓN $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

4.5.1. Muestra Patrón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión de las probetas patrones de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ se muestran a continuación.

En la Tabla 32 se muestran los resultados de diámetro, altura, área, peso y volumen obtenidos de las probetas de la muestra patrón en la cual se obtuvo un revenimiento de 9 cm.

Tabla 32

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de Cilindro	#	Fecha de Vaciado	D1 (cm)	D2 (cm)	D Prom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Vol. (cm ³)
Muestra Patrón de 210 kg/cm²	1	6/6/2022	15.28	15.21	15.25	30.13	182.53	12.94	5499.76
	2	6/6/2022	15.17	15.22	15.20	30.07	181.34	13.00	5452.86
	3	6/6/2022	15.17	15.16	15.17	30.14	180.62	12.90	5444.00
	4	6/6/2022	15.21	15.21	15.21	30.06	181.70	12.92	5461.82
	5	6/6/2022	15.19	15.22	15.21	30.03	181.58	12.86	5452.78
	6	6/6/2022	15.18	15.25	15.22	30.04	181.82	12.96	5461.77
Reven. 9 cm	7	6/6/2022	15.19	15.21	15.20	30.09	181.46	12.89	5460.08
	8	6/6/2022	15.10	15.17	15.14	30.10	179.91	12.93	5415.28
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	9	6/6/2022	15.20	15.22	15.21	30.06	181.70	12.97	5461.82
	10	6/6/2022	14.81	14.90	14.86	29.90	173.31	12.58	5182.11
	11	6/6/2022	15.00	15.10	15.05	32.10	177.89	12.80	5710.42
	12	6/6/2022	15.17	15.20	15.19	30.13	181.10	13.02	5456.56

En la Tabla 33 se muestran los resultados de pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra patrón de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 33

Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de Cilindro	#	Peso Vol. (kg/m ³)	Fecha de Rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)	
					(MPa)	(kg/cm ²)		
Muestra Patrón de 210 kg/cm²	1	2352.83	13/6/2022	244.7	13.85	141.23	7	
	2	2384.07	13/6/2022	242.6	13.73	140.00		
	3	2369.58	13/6/2022	246.7	13.96	142.35		
	4	2365.51	20/6/2022	336.8	19.06	194.35		
	5	2358.43	20/6/2022	335.1	18.96	193.34		14
	6	2372.86	20/6/2022	341.6	19.33	197.11		
	7	2360.77	27/6/2022	353.0	19.98	203.74		
Revenimiento 9 cm	8	2387.69	27/6/2022	357.6	20.24	206.39	21	
	9	2374.67	27/6/2022	357.3	20.22	206.18		
	10	2427.58	4/7/2022	379.6	21.48	219.03		
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	11	2241.52	4/7/2022	374.3	21.18	215.97	28	
	12	2386.12	4/7/2022	368.6	20.86	212.71		

En la Tabla 34 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra patrón de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 34

Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de Cilindro	#	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(Kg/cm ²)	(%)	
Muestra Patrón de 210 kg/cm ²	1	2368.83	141.19	67.24	136.5	65	7
	2						
	3						
	4						
Revenimiento 9 cm	5	2365.60	194.93	92.83	189	90	14
	6						
	7						
	8						
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	9	2374.37	205.44	97.83	199.5	95	21
	10						
	11						
	12						

4.5.2. Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín

En la Tabla 35 se muestran los resultados de diámetro, altura, área, peso y volumen obtenidos de las probetas de la muestra con 5% de reemplazo de cemento por metacaolín en la cual se obtuvo un revenimiento de 8.5 cm

Tabla 35

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Fecha de Vaciado	D1 (cm)	D2 (cm)	D Prom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Vol. (cm ³)
Muestra de 210 kg/cm ² con 5% de MK	1	8/6/2022	15.20	15.21	15.21	30.07	181.58	12.88	5460.04
	2	8/6/2022	15.10	15.06	15.08	30.14	178.60	12.89	5383.14
	3	8/6/2022	15.20	15.23	15.22	30.20	181.82	12.84	5490.86
	4	8/6/2022	15.01	15.07	15.04	30.03	177.66	12.82	5335.08
	5	8/6/2022	15.24	15.24	15.24	30.09	182.41	12.90	5488.86
	6	8/6/2022	15.10	15.11	15.11	30.10	179.20	12.86	5393.84
Reven. 8.5 cm	7	8/6/2022	15.06	15.08	15.07	30.08	178.37	12.82	5365.30
	8	8/6/2022	15.08	15.12	15.10	30.12	179.08	12.76	5393.85
	9	8/6/2022	15.10	15.07	15.09	30.11	178.72	12.80	5381.35
	10	8/6/2022	15.02	15.04	15.03	30.15	177.42	12.59	5349.28
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	11	8/6/2022	15.13	15.18	15.16	30.16	180.39	12.82	5440.43
	12	8/6/2022	15.22	15.25	15.24	30.02	182.30	13.00	5472.50

En la Tabla 36 se muestran los resultados de pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra con 5% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 36

Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Peso Vol. (kg/m^3)	Fecha de Rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)	
					(MPa)	(kg/cm^2)		
Muestra de 210 kg/cm^2 con 5% de MK	1	2358.96	15/6/2022	263.4	14.91	152.04	7	
	2	2394.51	15/6/2022	248.3	14.05	143.27		
	3	2338.43	15/6/2022	260.1	14.72	150.10		
	4	2402.96	22/6/2022	363.8	20.59	209.96		
Revenimiento	5	2350.22	22/6/2022	369.0	20.88	212.91	14	
	6	2384.20	22/6/2022	357.7	20.24	206.39		
	7	2389.43	29/6/2022	373.5	21.14	215.56		
	8	2365.66	29/6/2022	377.9	21.39	218.11		
Resistencia de diseño	8.5 cm	9	2378.59	29/6/2022	377.8	21.38	218.01	21
	10	2353.59	6/7/2022	391.6	22.16	225.97		
Resistencia de diseño	210 kg/cm^2	11	2356.43	6/7/2022	387.6	21.93	223.62	28
	12	2375.52	6/7/2022	388.9	22.01	224.44		

En la Tabla 37 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 5% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 37

Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Densidad (Kg/m^3)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)						
					(Kg/cm^2)	(%)							
Muestra de 210 kg/cm^2 con 5% de MK	1	2363.97	148.47	70.70	136.5	65	7						
	2												
	3												
	4												
Revenimiento	5	2379.13	209.75	99.88	189	90	14						
	6												
	7												
	8												
Resistencia de diseño	8.5 cm	2377.89	217.23	103.44	199.5	95	21						
	9												
	210 kg/cm^2							2361.85	224.67	106.99	207.9	99	28
	10												
11	12												

4.5.3. Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo por metacaolín

En la Tabla 38 se muestran los resultados de diámetro, altura, área, peso y volumen obtenidos de las probetas de la muestra con 10% de reemplazo de cemento por metacaolín en la cual se obtuvo un revenimiento de 8.5 cm

Tabla 38

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Fecha de Vaciado	D1 (cm)	D2 (cm)	D Prom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Vol. (cm ³)
Muestra de 210 kg/cm² con 10% de MK	1	14/6/2022	15.14	15.10	15.12	30.02	179.55	12.79	5390.19
	2	14/6/2022	15.11	15.10	15.11	30.06	179.20	12.83	5386.67
	3	14/6/2022	15.17	15.14	15.16	30.02	180.39	12.74	5415.17
	4	14/6/2022	15.01	15.11	15.06	30.13	178.13	12.83	5367.09
	5	14/6/2022	15.17	15.09	15.13	30.04	179.79	12.82	5400.92
	6	14/6/2022	15.18	15.14	15.16	30.18	180.50	12.84	5447.63
Reven. 8.5 cm	7	14/6/2022	15.16	15.18	15.17	30.15	180.74	12.89	5449.40
	8	14/6/2022	15.15	15.14	15.15	30.12	180.15	12.90	5426.05
	9	14/6/2022	15.18	15.15	15.17	30.16	180.62	12.91	5447.61
	10	14/6/2022	15.20	15.23	15.22	30.06	181.82	12.80	5465.41
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	11	14/6/2022	15.20	15.18	15.19	30.20	181.22	12.76	5472.84
	12	14/6/2022	15.15	15.07	15.11	29.99	179.32	12.82	5377.68

En la Tabla 39 se muestran los resultados de pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra con 10% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 39

Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 10% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Peso Vol. (kg/m ³)	Fecha de Rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)	
					(MPa)	(kg/cm ²)		
Muestra de 210 kg/cm² con 10% de MK	1	2372.83	21/6/2022	250.2	14.16	144.39	7	
	2	2381.81	21/6/2022	251.4	14.23	145.10		
	3	2352.65	21/6/2022	248.3	14.05	143.27		
	4	2390.49	28/6/2022	357.8	20.25	206.49		
	5	2373.67	28/6/2022	348.5	19.72	201.08		14
	6	2356.99	28/6/2022	354.5	20.06	204.55		
Revenimiento 8.5 cm	7	2365.40	05/7/2022	365.0	20.66	210.67	21	
	8	2377.42	05/7/2022	373.2	21.12	215.36		
	9	2369.85	05/7/2022	364.6	20.63	210.36		
	10	2342.00	12/7/2022	388.4	21.98	224.13		
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	11	2331.52	12/7/2022	369.5	20.91	213.22	28	
	12	2383.93	12/7/2022	386.8	21.89	223.21		

En la Tabla 40 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 10% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 40

Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm² con 10% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(Kg/cm ²)	(%)	
Muestra de 210 kg/cm² con 10% de MK	1						
	2	2369.09	144.25	68.69	136.5	65	7
	3						
	4						
	5	2373.72	204.04	97.16	189	90	14
Revenimiento 8.5 cm	6						
	7						
	8	2370.89	212.13	101.02	199.5	95	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	9						
	10						
	11	2352.48	220.19	104.85	207.9	99	28
	12						

4.5.4. Muestra $f'c = 210$ kg/cm² con 15% de reemplazo por metacaolín

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión de las probetas de $f'c = 210$ kg/cm² con 15% de reemplazo con metacaolín se muestran a continuación.

Tabla 41

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm² con 15% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Fecha de Vaciado	D1 (cm)	D2 (cm)	D Prom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Vol. (cm ³)
Muestra de 210 kg/cm² con 15% de MK	1	14/6/2022	15.21	15.24	15.23	30.04	182.02	12.77	5468.96
	2	14/6/2022	15.16	15.21	15.19	30.18	181.10	12.71	5465.61
	3	14/6/2022	15.19	15.25	15.22	30.19	181.94	12.68	5492.65
	4	14/6/2022	15.11	15.00	15.06	30.10	178.01	12.50	5358.19
	5	14/6/2022	15.15	15.09	15.12	30.00	179.55	12.70	5386.60
Reven. 6.5 cm	6	14/6/2022	15.06	14.91	14.99	29.90	176.36	12.58	5273.20
	7	14/6/2022	15.18	15.14	15.16	30.12	180.50	12.55	5436.80
	8	14/6/2022	15.09	15.13	15.11	30.15	179.32	12.73	5406.37
	9	14/6/2022	15.16	15.13	15.15	30.13	180.15	12.62	5427.85
	10	14/6/2022	15.20	15.18	15.19	30.06	181.22	12.54	5447.46
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	11	14/6/2022	14.95	14.96	14.96	30.02	175.66	12.42	5273.19
	12	14/6/2022	15.09	15.19	15.14	29.99	180.03	12.52	5399.06

En la Tabla 42 se muestran los resultados de pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra con 15% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 42

Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Peso Vol. (kg/m^3)	Fecha de Rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)	
					(MPa)	(kg/cm^2)		
Muestra de 210 kg/cm^2 con 15% de MK	1	2335.00	21/6/2022	235.5	13.33	135.93	7	
	2	2325.45	21/6/2022	234.8	13.29	135.52		
	3	2308.54	21/6/2022	231.1	13.08	133.38		
	4	2332.88	28/6/2022	316.1	17.89	182.42		
Revenimiento	6.5 cm	5	2357.70	28/6/2022	319.7	18.09	184.46	14
		6	2385.65	28/6/2022	317.4	17.96	183.14	
		7	2308.34	05/7/2022	337.6	19.11	194.86	
		8	2354.63	05/7/2022	343.3	19.43	198.13	21
Resistencia de diseño	210 kg/cm^2	9	2325.05	05/7/2022	342.7	19.39	197.72	
		10	2301.99	12/7/2022	363.5	20.57	209.75	
		11	2355.31	12/7/2022	361.2	20.44	208.43	28
		12	2318.92	12/7/2022	369.3	20.90	213.12	

En la Tabla 43 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 15% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 43

Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Densidad (Kg/m^3)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)	
					(Kg/cm^2)	(%)		
Muestra de 210 kg/cm^2 con 15% de MK	1	2322.99	134.94	64.26	136.5	65	7	
	2							
	3							
	4							
Revenimiento	6.5 cm	5	2358.74	183.34	87.31	189	90	14
		6						
		7						
		8	2329.34	196.90	93.76	199.5	95	21
Resistencia de diseño	210 kg/cm^2	9						
		10						
		11	2325.41	210.43	100.21	207.9	99	28
		12						

4.5.5. Muestra $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo por metacaolín

En la Tabla 44 se muestran los resultados de diámetro, altura, área, peso y volumen obtenidos de las probetas de la muestra con 20% de reemplazo de cemento por metacaolín en la cual se obtuvo un revenimiento de 5.5 cm

Tabla 44

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Fecha de Vaciado	D1 (cm)	D2 (cm)	D Prom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Vol. (cm ³)
Muestra de 210 kg/cm² con 20% de MK	1	15/6/2022	15.16	15.18	15.17	29.97	180.74	12.49	5416.86
	2	15/6/2022	15.22	15.12	15.17	30.09	180.74	12.50	5438.55
	3	15/6/2022	14.89	14.81	14.85	29.82	173.20	12.42	5164.76
	4	15/6/2022	15.09	15.08	15.09	30.14	178.72	12.44	5386.71
	5	15/6/2022	14.86	14.89	14.88	30.23	173.78	12.46	5253.42
Reven. 5.5 cm	6	15/6/2022	15.12	15.15	15.14	30.13	179.91	12.54	5420.68
	7	15/6/2022	15.18	15.20	15.19	30.11	181.22	12.69	5456.53
	8	15/6/2022	15.19	15.16	15.18	30.12	180.86	12.58	5447.56
	9	15/6/2022	15.14	15.20	15.17	30.15	180.74	12.61	5449.40
	10	15/6/2022	15.18	15.27	15.23	30.28	182.06	12.70	5512.65
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	11	15/6/2022	15.30	15.26	15.28	30.00	183.37	12.60	5501.21
	12	15/6/2022	15.09	15.06	15.08	29.99	178.49	12.62	5352.80

En la Tabla 45 se muestran los resultados de pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra con 20% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 45

Pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 20% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Peso Vol. (kg/m ³)	Fecha de Rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)
					(MPa)	(kg/cm ²)	
Muestra de 210 kg/cm² con 20% de MK	1	2305.76	22/6/2022	211.5	11.97	122.06	7
	2	2298.41	22/6/2022	211.5	11.97	122.06	
	3	2404.76	22/6/2022	236.6	13.39	136.54	
	4	2309.39	29/6/2022	296.9	16.80	171.31	
	5	2371.79	29/6/2022	305.2	17.27	176.10		14
Revenimiento 5.5 cm	6	2313.36	29/6/2022	300.2	16.99	173.25	21
	7	2325.66	06/7/2022	323.9	18.33	186.91	
	8	2309.29	06/7/2022	333.7	18.85	192.21	
	9	2314.02	06/7/2022	320.7	18.15	185.08	
	10	2303.79	13/7/2022	349.0	19.75	201.39		28
Resistencia de diseño 210 kg/cm²	11	2290.41	13/7/2022	357.5	20.23	206.29	28
	12	2357.64	13/7/2022	346.7	19.62	200.07	

En la Tabla 46 se muestran los resultados de resistencias promedio y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 20% de reemplazo de cemento por metacaolín de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 46

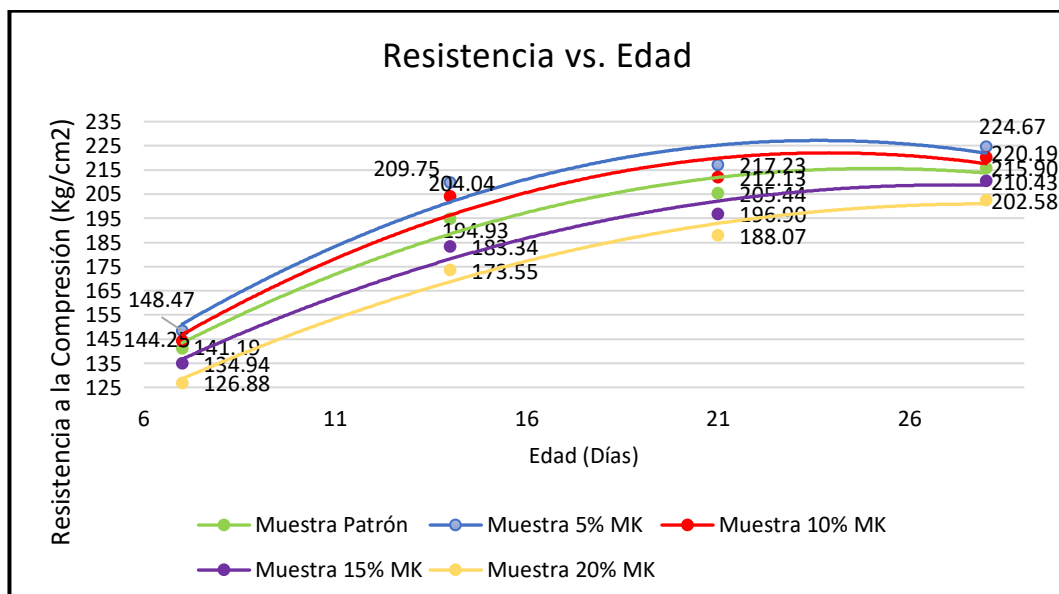
Resistencia promedio y eficiencia de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm² con 20% de reemplazo por metacaolín

Tipo de Cilindro	#	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(Kg/cm ²)	(%)	
Muestra de 210 kg/cm ² con 20% de MK	1						
	2	2336.31	126.88	60.42	136.5	65	7
	3						
	4						
	5	2331.51	173.55	82.64	189	90	14
Revenimiento 5.5 cm	6						
	7						
	8	2316.32	188.07	89.56	199.5	95	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	9						
	10						
	11	2317.28	202.58	96.47	207.9	99	28
	12						

En la Figura 26 se representan las curvas de Resistencia vs Edad para las distintas muestras de $f'c$ de 210 kg/cm² con porcentajes de metacaolín (5%, 10%, 15% y 20%) y la muestra patrón de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Figura 26

Gráfico de curvas de "Resistencia vs. Edad"



4.5.6. Análisis y discusión de resultados de las muestras por cada porcentaje de metacaolín

Realizado los cálculos mostrados en la Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34, para la muestra patrón de $f'c$ de 210 kg/cm^2 obtuvimos una resistencia de $f'c= 215.90 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad.

Torres et. al (2011) en su proyecto de investigación “Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto” concluyen que el porcentaje de adición influye notoriamente en las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos adicionados con MK, pues ellos encontraron que hasta el 20% de adición de MK, las propiedades mecánicas aumentan con el porcentaje de adición. Sin embargo, en proporciones mayores, esta propiedad se ve disminuida, y puede deberse a que queda material sin reaccionar, que actúa como un relleno dentro de la mezcla, para nuestro proyecto de investigación, observando la Figura 26 en donde se representan las curvas de Resistencia vs Edad para las distintas muestras de $f'c$ de 210 kg/cm^2 , podemos evidenciar que con la sustitución del cemento por metacaolín al 5% en relación de su peso, se obtiene mejor resistencia a la compresión a los 28 días de edad ($f'c= 224.67 \text{ kg/cm}^2$) comparado al hormigón patrón, también se puede evidenciar que con la sustitución del cemento por metacaolín al 10% en relación de su peso, también se obtiene mejor resistencia a la compresión a 28 días de edad ($f'c= 220.19 \text{ kg/cm}^2$) comparado al hormigón patrón.

Así mismo la sustitución de cemento por metacaolín al 15% y 20 % en relación de su peso, no presenta mejoramiento a la resistencia del hormigón, más bien presenta reducción de la resistencia del hormigón obteniendo los valores $f'c= 210.43 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c= 202.58 \text{ kg/cm}^2$ respectivamente a 28 días edad, valores que se encuentran por debajo en comparación a la muestra patrón y a las muestras con 5% y 10% de reemplazo.

Se deduce entonces que con la sustitución del cemento por metacaolín al 5% y 10% en relación de su peso mejora la resistencia a la compresión de un hormigón convencional de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$, además que la sustitución del cemento

por metacaolín al 15% y 20% en relación de su peso reduce la resistencia a la compresión de manera considerable a 28 días de edad.

4.5.7. Resistencia promedio a 7 días

En la Tabla 47 se muestra las resistencias a los 7 días para la dosificación de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con los porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de reemplazo de cemento por metacaolín.

Tabla 47

Resistencia a los 7 días para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín

Porcentaje de Metacaolín	Resistencia (Kg/cm ²)			Resistencia Total	Resistencia Promedio
	1	2	3		
0%	141.23	140.00	142.35	423.58	141.19
5%	152.04	143.27	150.10	445.40	148.47
10%	144.39	145.10	143.27	432.76	144.25
15%	135.93	135.52	133.38	404.82	134.94
20%	122.06	122.06	136.54	380.65	126.88

4.5.8. Resistencia promedio a 14 días

En la Tabla 48 se muestra las resistencias a los 14 días para la dosificación de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con los porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de reemplazo de cemento por metacaolín.

Tabla 48

Resistencia a los 14 días para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín

Porcentaje de Metacaolín	Resistencia (Kg/cm ²)			Resistencia Total	Resistencia Promedio
	1	2	3		
0%	194.35	193.34	197.11	584.80	194.93
5%	209.96	212.91	206.39	629.26	209.75
10%	206.49	201.08	204.55	612.13	204.04
15%	182.42	184.46	183.14	550.03	183.34
20%	171.31	176.10	173.25	520.66	173.55

4.5.9. Resistencia promedio a 21 días

En la Tabla 49 se muestra las resistencias a los 21 días para la dosificación de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con los porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de reemplazo de cemento por metacaolín.

Tabla 49

Resistencia a los 21 días para $f'c= 210\text{kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín.

Porcentaje de Metacaolín	Resistencia (Kg/cm ²)			Resistencia Total	Resistencia Promedio
	1	2	3		
0%	203.74	206.39	206.18	616.31	205.44
5%	215.56	218.11	218.01	651.69	217.23
10%	210.67	215.36	210.36	636.39	212.13
15%	194.86	198.3	197.72	590.71	196.90
20%	186.91	192.21	185.08	564.20	188.07

4.5.10. Resistencia promedio a 28 días

En la Tabla 50 se muestra las resistencias a los 28 días para la dosificación de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con los porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20% de reemplazo de cemento por metacaolín.

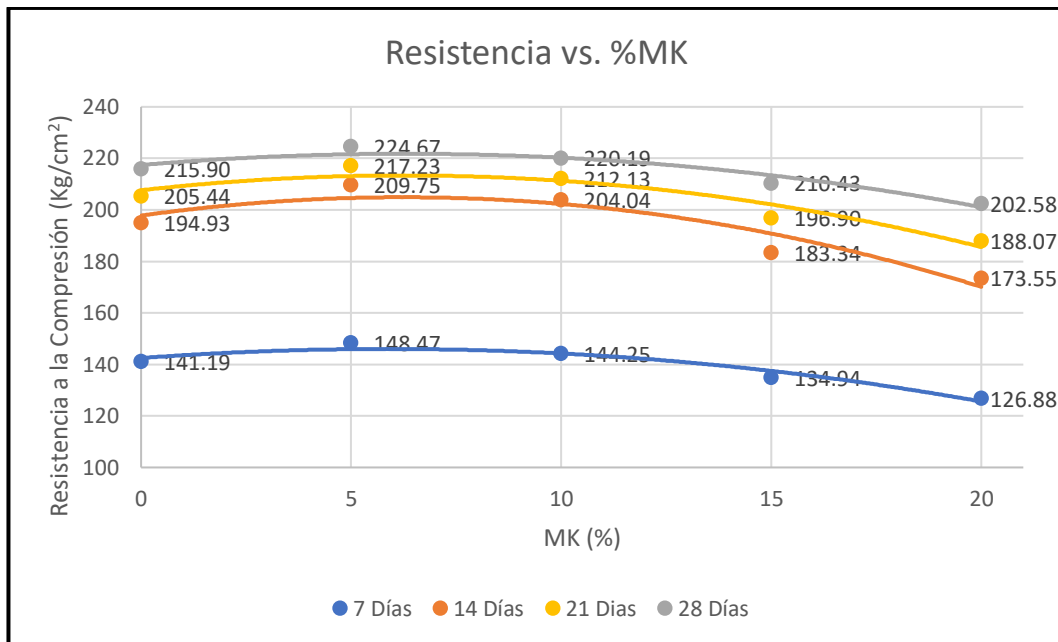
Tabla 50

Resistencia a los 28 días para $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín

Porcentaje de Metacaolín	Resistencia (Kg/cm ²)			Resistencia Total	Resistencia Promedio
	1	2	3		
0%	219.03	215.97	212.71	647.71	215.90
5%	225.97	223.62	224.44	674.02	224.67
10%	224.13	213.22	223.21	660.56	220.19
15%	209.75	208.43	213.12	631.30	210.43
20%	201.39	206.29	200.07	607.74	202.58

En la Figura 27 se representan las curvas de Resistencia vs MK (metacaolín) para las distintas muestras de $f'c$ de 210 kg/cm^2 con porcentajes de metacaolín (5%, 10%, 15% y 20%) y las resistencias obtenidas a las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Figura 27
Gráfico de curvas de "Resistencia vs. %MK"



4.5.11. Análisis y discusión de los resultados de las muestras de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por metacaolín por edad

Rodríguez (2016) en su trabajo de investigación "Comportamiento del hormigón añadido metacaolín como sustituto del cemento, utilizando los agregados existentes en la provincia de Pastaza" determinó que el hormigón con adiciones del 10% de metacaolín mejoró las propiedades tanto físicas como mecánicas, obteniendo que la consistencia fue buena, y la resistencia a la compresión fue mayor a los 28 días de curado, mientras que en nuestro trabajo de investigación, al observar en la Figura 27 y la Tabla 47 se puede observar que a los 7 días de edad los diseños de hormigón con sustitución del cemento por metacaolín del 5% y 10%, obtienen un incremento del 3.46% y 1.46% de resistencia respectivamente en comparación a la muestra patrón; mientras que los diseños del hormigón con sustitución del

cemento por metacaolín del 15% y 20% presentan una reducción del 2.98% y 6.81% de resistencia respectivamente en comparación a la muestra patrón, se evidencia que por porcentajes de sustitución por metacaolín mayores al 10% presenta un efecto negativo en la resistencia a la compresión en esta edad temprana.

De igual manera en la Figura 27 y en la Tabla 48 se puede observar que a la edad de 14 días de edad los diseños de hormigón con sustitución del cemento por metacaolín del 5% y 10%, obtienen un incremento del 7.06% y 4.34% de resistencia respectivamente en comparación a la muestra patrón; mientras que los diseños del hormigón con sustitución del cemento por metacaolín del 15% y 20% presentan una reducción del 5.52% y 10.18% de resistencia respectivamente en comparación a la muestra patrón, se evidencia que por porcentajes de sustitución por metacaolín mayores al 10% presenta un efecto negativo en la resistencia a la compresión en esta edad.

En la misma Figura 27 y en la Tabla 49 se puede observar que a la edad de 21 días de edad los diseños de hormigón con sustitución del cemento por metacaolín del 5% y 10%, obtienen un incremento del 5.62% y 3.19% de resistencia respectivamente en comparación a la muestra patrón; mientras que los diseños del hormigón con sustitución del cemento por metacaolín del 15% y 20% presentan una reducción del 4.06% y 8.27% de resistencia respectivamente en comparación a la muestra patrón, se evidencia que por porcentajes de sustitución por metacaolín mayores al 10% presenta un efecto negativo en la resistencia a la compresión en esta edad.

Con la Tabla 50 y la Figura 27 se puede observar que a la edad de 28 días los valores de la resistencia han mejorado de manera satisfactoria en los diseños de hormigón con sustitución del cemento por metacaolín del 5% y 10%, esto se debe a que el metacaolín provoco más reacción puzolánica con la Portlandita (Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)) que se encuentra presente en el cemento, adquiriendo un aumento del 4.18% y 2.04% respectivamente en comparación a la muestra patrón mientras que como se era de esperar los diseños de hormigón con sustitución del cemento del 15% y 20% presentan una reducción del 2.61% y 6.34%

respectivamente en comparación a la muestra patrón. Se evidencia que los diseños que más resistencia adquirieron hasta los 28 días son las que presentan sustitución del 5% y 10% de cemento por metacaolín.

4.6 ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO

En el presente trabajo de investigación se consideró realizar el análisis de precio unitario de un metro cúbico de hormigón con cemento de uso general de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ de diseño con sustitución de metacaolín en porcentajes que van desde el 0% la cual es nuestra muestra de control, 5% de metacaolín y 10% de metacaolín que son los porcentajes con que se obtuvieron mayores resistencias a la compresión.

Los precios unitarios ejecutados dentro del trabajo de investigación son con valores comerciales en el cantón Santa Elena, usando agua potable con un costo de \$0.61 por m^3 , el agregado grueso de Calizas Huayco S.A proveniente de la ciudad de Guayaquil a \$22.40 el m^3 , arena gruesa proveniente del cantón Milagro a \$18.48 el m^3 , cemento Holcim de uso general tipo GU a \$8.30 el saco de 50 kg, y el metacaolín KaMin 70C a un precio de \$1.20 el Kg.

El diseño de mezcla de hormigón patrón en la cual se obtuvo la resistencia a la compresión de 215.90 Kg/cm^2 a los 28 días, al realizar el análisis de precios unitario se obtuvo el costo de este hormigón convencional a \$143.61 el m^3 como se detalla en la Tabla 51.

El diseño de mezcla de hormigón con sustitución del 5% de metacaolín obtuvo una mejor resistencia a la compresión a 28 días de curado de 224.67 Kg/cm^2 siendo la mayor en comparación a los demás porcentajes de sustitución, al realizar el análisis de precios unitarios, el mismo alcanza un precio de \$166.20 el m^3 como se detalla en la Tabla 52 siendo más costoso que el m^3 de hormigón simple de $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ con los precios vigentes de cada uno de los materiales; mientras que el diseño con sustitución del 10% de metacaolín con una resistencia de 220.19 Kg/cm^2 al realizar el análisis de precios unitarios, el mismo alcanza un precio de \$188.80 el m^3 como se detalla en la Tabla 53 siendo más costoso que el m^3 de hormigón con sustitución del 5% de metacaolín.

Tabla 51

Análisis de precios unitario de Hormigón patrón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
TEMA	"DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm ² "				
RUBRO:	1.00	UNIDAD:	M3		
DETALLE:	HORMIGON DE F'C= 210 KG/CM2				
EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor 5 % M/O					1.5590
Concreteira de 1 saco	1.000	5.0000	5.0000	1.0000	5.0000
Vibrador	1.000	5.0000	5.0000	1.0000	5.0000
SUBTOTAL M =					11.5590
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION (CATEGORIAS)	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Peon (estr.ocp. E2)	5.000	3.8300	19.1500	1.0000	19.1500
Albañil (estr.ocp. D2)	2.000	3.8700	7.7400	1.0000	7.7400
Maestro (estr.ocp. C1)	1.000	4.2900	4.2900	1.0000	4.2900
SUBTOTAL N =					31.1800
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Cemento tipo I(50 Kg)	KG	349.638	0.1660	58.0399	
Agua	m3	0.183	0.6100	0.1116	
Arena	m3	0.298	18.4800	5.5070	
Piedra	m3	0.379	22.4000	8.4896	
Metacaolin	KG	0.000	1.2000		
SUBTOTAL O =					72.1481
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
SUBTOTAL P =					0.0000
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					114.8871
INDIRECTOS Y UTILIDAD				25.00%	28.7218
OTROS INDIRECTOS				0.00%	0.0000
COSTO TOTAL DEL RUBRO					143.6089
VALOR OFERTADO				\$	143.61

Tabla 52

Análisis de precios unitario de Hormigón de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución del 5% con metacaolín.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
TEMA	"DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm ² "				
RUBRO:	2.00	UNIDAD:	M3		
DETALLE:	HORMIGON DE F'C= 210 KG/CM2 CON 5% DE SUSTITUCION DE CEMENTO POR METACAOLIN				
EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor 5 % M/O					1.5590
Concreteira de 1 saco	1.000	5.0000	5.0000	1.0000	5.0000
Vibrador	1.000	5.0000	5.0000	1.0000	5.0000
SUBTOTAL M =					11.5590
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION (CATEGORIAS)	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Peon (estr.ocp. E2)	5.000	3.8300	19.1500	1.0000	19.1500
Albañil (estr.ocp. D2)	2.000	3.8700	7.7400	1.0000	7.7400
Maestro (estr.ocp. C1)	1.000	4.2900	4.2900	1.0000	4.2900
SUBTOTAL N =					31.1800
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Cemento tipo I(50 Kg)	KG	332.156	0.1660	55.1379	
Agua	m3	0.183	0.6100	0.1116	
Arena	m3	0.298	18.4800	5.5070	
Piedra	m3	0.379	22.4000	8.4896	
Metacaolín	KG	17.482	1.2000	20.9783	
SUBTOTAL O =					90.2244
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
SUBTOTAL P =					0.0000
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					132.9634
INDIRECTOS Y UTILIDAD					25.00%
OTROS INDIRECTOS					0.00%
COSTO TOTAL DEL RUBRO					166.2043
VALOR OFERTADO					\$ 166.20

Tabla 53

Análisis de precios unitario de Hormigón de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución del 10% con metacaolín.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
TEMA	"DISEÑO DE MEZCLA DE HORMIGÓN UTILIZANDO METACAOLIN PARA OBTENER UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MAYOR A 210 Kg/cm ² "				
RUBRO:	3.00	UNIDAD:	M3		
DETALLE:	HORMIGON DE F'C= 210 KG/CM2 CON 10% DE SUSTITUCION DE CEMENTO POR METACAOLIN				
EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HOR.	ENDIMIEN	COSTO
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor 5 % M/O					1.5590
Concreteira de 1 saco	1.000	5.0000	5.0000	1.0000	5.0000
Vibrador	1.000	5.0000	5.0000	1.0000	5.0000
SUBTOTAL M =					11.5590
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION	CANTIDAD	ORNAL / H	COSTO HOR.	ENDIMIEN	COSTO
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Peon (estr.ocp. E2)	5.000	3.8300	19.1500	1.0000	19.1500
Albañil (estr.ocp. D2)	2.000	3.8700	7.7400	1.0000	7.7400
Maestro (estr.ocp. C1)	1.000	4.2900	4.2900	1.0000	4.2900
SUBTOTAL N =					31.1800
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	RECIO UNIT	COSTO	
		A	B	C=A*B	
Cemento tipo I(50 Kg)	KG	314.674	0.1660	52.2359	
Agua	m3	0.183	0.6100	0.1116	
Arena	m3	0.298	18.4800	5.5070	
Piedra	m3	0.379	22.4000	8.4896	
Metacaolín	KG	34.964	1.2000	41.9565	
SUBTOTAL O =				108.3006	
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO	
		A	B	C=A*B	
SUBTOTAL P =				0.0000	
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					151.0396
INDIRECTOS Y UTILIDAD				25.00%	37.7599
OTROS INDIRECTOS				0.00%	0.0000
COSTO TOTAL DEL RUBRO					188.7995
VALOR OFERTADO				\$	188.80

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se diseñó diversas dosificaciones de hormigón con varios porcentajes de metacaolín (5%, 10%, 15% y 20%) reemplazando el cemento obteniendo que el 5% y 10% mejoran de manera satisfactoria la resistencia a la compresión adquiriendo un aumento del 4.18% y 2.04% respectivamente en comparación a la muestra patrón, mientras que con el 15% y 20% la resistencia a la compresión disminuye en 2.61% y 6.34% respectivamente en comparación a la muestra patrón.

Se trabajó en las dosificaciones con la misma relación A/C (0.55), las dosificaciones 5% y 10% en estado fresco presentaron buena trabajabilidad, las cuales en estado endurecido alcanzaron mejores densidades de 2370.71 kg/m³ y 2366.55 kg/m³ respectivamente en comparación a la mezcla patrón que tuvo una densidad de 2365.14 kg/m³, mientras que las mezclas con 15% y 20% presentaron trabajabilidad regular-buena y densidades bajas de 2334.12 kg/m³ y 2325.36 kg/m³ en comparación a la mezcla patrón.

Se realizó el diseño de mezcla de hormigón patrón en la cual se obtuvo la resistencia a la compresión de 215.90 Kg/cm² a los 28 días, y realizado el análisis de precios unitario se obtuvo el costo de este hormigón convencional a \$143.61 el m³.

Se determinó que el hormigón con sustitución del 5% de metacaolín obtuvo una mejor resistencia a la compresión a 28 días de curado de 224.67 Kg/cm² siendo la mayor en comparación a los demás porcentajes de sustitución, refiriéndonos en los análisis de precios unitarios, el mismo alcanza un precio de \$166.20 el m³ siendo más costoso que el m³ de hormigón simple de f'c= 210 Kg/cm² con los precios vigentes de cada uno de los materiales.

Tras el análisis, podemos deducir que la reducción de la resistencia a la compresión con porcentajes mayores al 10% de reemplazo del cemento por metacaolín se debe a que existe un exceso de partículas de metacaolín que se quedan sin reaccionar con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) proveniente del cemento, por lo que estas partículas al quedar libres en la mezcla y al contener bajos porcentajes de óxido de calcio que reaccionen con el agua hacen que no aporten resistencia al contrario provocan la reducción de esta debido a que se forman más poros en la mezcla.

Debido a que el metacaolín posee porcentajes muy bajos de contenido de óxido de calcio no se usa como cementante principal, por lo que se emplea como cementante suplementario al cemento convencional en porcentajes; ya que los componentes que proporcionan mejoras al hormigón son el óxido de silicio, óxido de aluminio y el óxido de hierro que se encuentran presente en el metacaolín los cuales son los que reaccionan con el hidróxido de calcio presente en el cemento convencional formando un gel extra de silicato de calcio hidratado, reduciendo los poros aumentando la densidad y aumentando la resistencia.

Se concluye que el uso de metacaolín como cementante suplementario mejora la resistencia a la compresión de un hormigón por lo que se puede considerar como alternativa cuando se requiera resistencias mayores a las convencionales.

5.2 RECOMENDACIONES

Se sugiere el uso del 5% de metacaolín en reemplazo del cemento debido a que la resistencia a la compresión mejora, incluso se recomienda que el metacaolín a usarse esté calcinado a las temperaturas adecuadas que van desde 500-900°C para que así no pierda sus propiedades puzolánicas.

También, se recomienda que se realicen ensayos de composición química y de barrido microscópico “Análisis de difracción de Rayos X (DRX)” para conocer la estructura cristalográfica del metacaolín después de su calcinación.

En el ámbito civil se recomienda el uso del 5% de metacaolín en reemplazo del cemento para fundición de contrapisos, aceras con y sin malla, bordillos, losas

colaborantes; sin embargo, el uso de metacaolín resulta más costoso con relación al hormigón simple de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Se recomienda a los estudiantes de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, continuar con estudios experimentales usando otras puzolanas que cumplan con la norma ASTM C618; además trabajos experimentales con metacaolín con diferentes tamaños de agregados y analizar el comportamiento del hormigón para su aplicación en el ámbito civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- America's Cement Manufacturers PCA. (2019). How Cement is Made. Retrieved from <https://www.cement.org/cement-concrete/how-cement-is-made>
- Arias Gonzáles, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. In Vol. 1. E. C. EIRL (Ed.), (pp. 124). Retrieved from <https://www.tesisconjosearias.com/>
- ASTM Standard C33-03. (2003). Especificación estándar para AGREGADOS PARA CONCRETO. In *Annual book of ASTM standards*.
- ASTM Standard C331-07. (2007). "Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland-cement concrete". In *American Society for Testing Materials, USA*.
- ASTM Standard C618. (2008). Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete. In *Annual book of ASTM standards* (Vol. 4).
- Bastis Consultores. (2021). Método hipotético deductivo. Retrieved from <https://online-tesis.com/metodo-hipotetico-deductivo/>
- Cabrera, M. I. (2018). Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana, clasificados por sectores: vivienda, electricidad, gas/petróleo, salud y educación. *INGENIO*, 1(1), 15-30.
- Cáceres Silupu, F. G., & Chira Chávez, M. E. (2021). *Evaluación del mejor diseño de mezclas utilizando métodos ACI, Fuller y módulo de fineza en un concreto F'C 210 y 280 KG/CM2*. Universidad César Vallejo, Piura-Perú. Retrieved from https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/87122/C%c3%a1ceres_SFG-Chira_CME-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cauas, D. (2015). Definición de las variables, enfoque y tipo de investigación. *Bogotá: Biblioteca electrónica de la Universidad Nacional de Colombia* 2, 1-11.
- CEMEX. (2022). PRODUCTOS Retrieved from <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>
- Chandak, M. A., & Pawade, P. (2018). Influence of metakaolin in concrete mixture: a review. *The IJES* 37-41.
- Condori Ojeda, P. (2020). Universo, población y muestra. *Curso Taller*.

- Cordero, Á., Abrio, M., & Maqueda, M. J. (2012). El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia. *Tecnología y desarrollo*, 10, 13.
- Díaz Ponce Olga. (2012). *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica*. Facultad de Ingeniería, Univ. de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Retrieved from http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf
- Eliseo, G. (2021). Metodología de investigación, pautas para hacer Tesis. Retrieved from <https://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com/>
- Elizondo Martinez, E., Tataranni, P., Rodriguez Hernandez, J., & Castro Fresno, D. (2020). Physical and mechanical characterization of sustainable and innovative porous concrete for urban pavements containing metakaolin. *Sustainability* 12(10), 4243.
- Elster, J. (2006). *El cemento de la sociedad: las paradojas del orden social*: Editorial Gedisa.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, R., & Baptista Lucio, P. (2017). *Selección de la muestra*. In Vol. 6. *Metodología de la Investigación* (pp. 170-191). Retrieved from <https://investigaliacr.com/investigacion/seleccion-de-la-muestra-en-la-investigacion-cuantitativa/>
- Holcim. (2015). Cemento Fuerte. *LafargeHolcim*.
- Holcim Ecuador S.A. (2015). Holcim Fuerte Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general
- INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO INECYC. (2007). CONSEJO PRÁCTICOS SOBRE EL HORMIGÓN. In.
- Jiménez Menozcal, M. M., Mora Cabrera, C. O., Vargas Jiménez, J., & Córdova Rizo, F. J. (2017). *EVALUACIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND*. In Vol. 1. G. Compás (Ed.), (pp. 71). Retrieved from <http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/129/1/Libro%20.pdf>
- Li, R., Lei, L., & Plank, J. (2022). Impact of metakaolin content and fineness on the behavior of calcined clay blended cements admixed with HPEG PCE superplasticizer. *Cement Concrete Composites*, 104654.
- Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica* 3(1), 47-50.
- Manobanda Laica, C. D. (2013). *El curado del hormigón y su incidencia en las propiedades mecánicas finales*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., Ambato- Ecuador. Retrieved from <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/6528/1/Tesis%20763%20-%20Manobanda%20Laica%20Carlos%20David.pdf>

- Mansour, A., & Al Biajawi, M. (2022). The effect of the addition of metakaolin on the fresh and hardened properties of blended cement products: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- MINERALS, K. P. (2008). *KaMin 70C Calcined Kaolin Clay*. Retrieved from Estados Unidos: <https://www.kaminllc.com/uploads/docs/TPPS/Domestic%20PDF/KaMin%2070C.pdf>
- NACIONES UNIDAS. (2022). ODS 11- CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES. Retrieved from <https://ecuador.un.org/es/sdgs/11>
- National Ready Mixed Concrete Association, N. (2022). CIP 30 - Adiciones al cemento. *El Concreto en la Práctica*, 30, 2.
- NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC. (2015). NEC-SEHM ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. In. Ecuador
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN151. (2010). CEMENTO HIDRÁULICO. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS. In. Ecuador.
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 872. (2011). ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. REQUISITOS. In. Ecuador.
- NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2380. (2011). CEMENTOS HIDRÁULICOS. REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS. In. Ecuador.
- Orchesi Medina, L. E. (2019). *Evaluación de propiedades físico-mecánicas del concreto $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ sustituyendo cemento con una mezcla de esquistos y cenizas de cáscaras de arroz*. Universidad César Vallejo, Piura-Perú. Retrieved from https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/49447/Orchesi_MLE-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pinto, J., & Maldonado, E. (2018). *Metodología de la investigación social: Paradigmas: cuantitativo, sociocrítico, cualitativo, complementario*: Ediciones de la U.
- Restrepo Gutiérrez, J. C., Restrepo Baena, O. J., & Tobón, J. I. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland. *Dyna*, 73(150), 131-141.
- Rocha, E. B. D. d. (2017). *Avaliação do uso de caulim calcinado em composição de borracha nitrílica para aplicação na indústria de óleo e gás*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brazil. Retrieved from <https://www.bdttd.uerj.br:8443/handle/1/15828>
- Rodríguez Guevara, R. C. (2016). *Comportamiento del hormigón añadido metacaolín como sustituto del cemento, utilizando los agregados existentes en la provincia de Pastaza*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica Ambato-Ecuador. Retrieved from <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/23634/1/Tesis%20101033%20%20Rodr%c3%adguez%20Guevara%20Roberto%20Carlos.pdf>

- Santos, Albuquerque, & Ribeiro. (2020). Effect of the addition of metakaolin on the carbonation of Portland cement concretes. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 13, 1-18.
- Singh, S. B., & Murugan, M. (2022). Effect of metakaolin on the properties of pervious concrete. *Construction Building Materials*, 346, 128476.
- Soto Prado, M. A., & Villegas Ponce, K. D. (2019). *Influencia de las proporciones de los agregados en el hormigón y la dosificación con cemento sobre el peso unitario y compresión en un concreto convencional*. (Experimental), Universidad Nacional de Perú, Trujillo-Perú. Retrieved from <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/14758/SOTO%20PRADO%2c%20Marco%20Antonio%3b%20VILLEGAS%20PONCE%2c%20Kevin%20Deyvis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Torrent, R. J. (2020). Ensayos de Consistencia de Hormigón Fresco Convencional.
- Torres Agredo, J., Mejía de Gutiérrez, R., & Delvasto Arjona, S. (2011). Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado. *Ingeniería y Universidad*, 15(1), 77-90.
- Vargas Figueredo, J. R. (2017). *Obtención de una mezcla de concreto con residuos plásticos de equipos electrónicos para la fabricación de elementos no estructurales*. Universidad de La Costa, Barranquilla-Colombia. Retrieved from <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/212/1140871558%20-%201140875540.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wang, F. K., K Provis, JL Buchwald, A Cyr, Martin Patapy, C Kamali-Bernard, Siham Courard, Luc Sideris, K. (2018). Metakaolin. In Springer International Publishing (Ed.), *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials* (Ilustrada ed., Vol. 25, pp. 315): Springer.
- Yu, Z., Zhang, T., & Deng, Y. (2022). The micro-facial characteristics and mechanical behavior of metakaolin and steel fibers modified concrete at high fluidity. *Case Studies in Construction Materials*, 16, 17.

ANEXOS

Anexo 1

Peso de la masa retenida del agregado grueso



Anexo 2

Reducción del exceso de agua del agregado grueso para la D.S.S.S



Anexo 3

Saturación de muestra 1 del agregado grueso



Anexo 4

Saturación de muestra 2 del agregado grueso



Anexo 6
Tamizado del agregado fino



Anexo 5
Tamizado del agregado grueso



Anexo 7
Peso del agregado fino



Anexo 8
Peso del agregado grueso



Anexo 9

Vaciado de agregados para mezcla



Anexo 10

Ensayo del Cono de Abrams



Anexo 11

Vaciado de mezcla en cilindros y varillado



Anexo 12

Golpes con martillo de goma a moldes



Anexo 13

Cilindros con 5% y 10% de metacaolín



Anexo 14

Cilindros con 20% de metacaolín



Anexo 15

Desmolde de cilindros



Anexo 16

Cilindros en piscina de curado



Anexo 17

Peso de cilindros antes de rotura



Anexo 18

Colocación de cilindro para ensayo a compresión



Anexo 19

Ensayo a compresión



Anexo 20

Ensayo a compresión



Anexo 21

Ensayo de muestra 1 del agregado grueso y fino

MUESTRA 1																																					
AGREGADO GRUESO																																					
PESO VOLUMÉTRICO SUELTO			PESO VOLUMÉTRICO VARILLADO																																		
VOLUMEN	0.00973688	m3	VOLUMEN	0.00973688	m3																																
P.V.S + RECIPIENTE	23.46	kg	P.V.V + RECIPIENTE	25.52	kg																																
RECIPIENTE	10.99	kg	RECIPIENTE	10.99	kg																																
PESO	12.47	kg	PESO	14.53	kg																																
P.V.S	1280.698	kg/m3	P.V.V	1492.265	kg/m3																																
DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (D.S.S.S)																																					
P.S.S.S.			2000	gr																																	
W(canastilla sumergida)			1049	gr																																	
W(canastilla sumergida + material)			2285	gr																																	
W(canastilla sumergida + material) - W(canastilla)			1236	gr																																	
VOLUMEN			764	cm3																																	
D.S.S.S.			2.62	gr/cm3																																	
			2617.80	kg/m3																																	
PESO GRAVA SATURADA (gr) PESO GRAVA SECA (gr) AGUA DESALOJADA % Absorción																																					
1061		1042.6		18.4		1.76																															
AGREGADO FINO																																					
PESO VOLUMÉTRICO SUELTO			DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA																																		
VOLUMEN	0.00281	m3	P.S.S.S.	500	gr																																
P.V.S + RECIPIENTE	8.03	kg	LECTURA INICIAL	510	gr																																
RECIPIENTE	4.42	kg	LECTURA FINAL	698	gr																																
PESO	3.61	kg	W Desalojado	188	gr																																
P.V.S	1284.698	kg/m3	V Desalojado	188.00	cm3																																
D.S.S.S.			2.6596	gr/cm3	2659.57	kg/m3																															
PESO ARENA SATURADA (gr) PESO ARENA SECA (gr) AGUA DESALOJADA % Absorción																																					
362.15		356.85		5.3		1.49																															
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">HUMEDAD DE ARENA</th> <th colspan="2">HUMEDAD DE GRAVA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RECIPIENTE</td> <td>Z6</td> <td>RECIPIENTE</td> <td>LAB 42-3</td> </tr> <tr> <td>W RECIPIENTE (gr)</td> <td>165.00</td> <td>W RECIPIENTE (gr)</td> <td>125.00</td> </tr> <tr> <td>W ARENA+R</td> <td>1565.00</td> <td>W GRAVA +R</td> <td>1125.00</td> </tr> <tr> <td>W ARENA SECA+R</td> <td>1504.00</td> <td>W GRAVA SECA+R</td> <td>1119.00</td> </tr> <tr> <td>W de AGUA</td> <td>61.00</td> <td>W de AGUA</td> <td>6.00</td> </tr> <tr> <td>W ARENA SECA</td> <td>1339.00</td> <td>W GRAVA SECA</td> <td>994.00</td> </tr> <tr> <td>HUMEDAD</td> <td>4.56</td> <td>HUMEDAD</td> <td>0.60</td> </tr> </tbody> </table>						HUMEDAD DE ARENA		HUMEDAD DE GRAVA		RECIPIENTE	Z6	RECIPIENTE	LAB 42-3	W RECIPIENTE (gr)	165.00	W RECIPIENTE (gr)	125.00	W ARENA+R	1565.00	W GRAVA +R	1125.00	W ARENA SECA+R	1504.00	W GRAVA SECA+R	1119.00	W de AGUA	61.00	W de AGUA	6.00	W ARENA SECA	1339.00	W GRAVA SECA	994.00	HUMEDAD	4.56	HUMEDAD	0.60
HUMEDAD DE ARENA		HUMEDAD DE GRAVA																																			
RECIPIENTE	Z6	RECIPIENTE	LAB 42-3																																		
W RECIPIENTE (gr)	165.00	W RECIPIENTE (gr)	125.00																																		
W ARENA+R	1565.00	W GRAVA +R	1125.00																																		
W ARENA SECA+R	1504.00	W GRAVA SECA+R	1119.00																																		
W de AGUA	61.00	W de AGUA	6.00																																		
W ARENA SECA	1339.00	W GRAVA SECA	994.00																																		
HUMEDAD	4.56	HUMEDAD	0.60																																		

Anexo 22

Ensayo de muestra 2 del agregado grueso y fino

MUESTRA 2					
AGREGADO GRUESO					
PESO VOLUMÉTRICO SUELTO			PESO VOLUMÉTRICO VARILLADO		
VOLUMEN	0.00973688	m3	VOLUMEN	0.00973688	m3
P.V.S + RECIPIENTE	23.500	kg	P.V.V + RECIPIENTE	25.56	kg
RECIPIENTE	10.99	kg	RECIPIENTE	10.99	kg
PESO	12.51	kg	PESO	14.57	kg
P.V.S	1284.806	kg/m3	P.V.V	1496.373	kg/m3
DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (D.S.S.S)					
P.S.S.S.			2000	gr	
W(canastilla sumergida)			1049	gr	
W(canastilla sumergida + material)			2285	gr	
W(canastilla sumergida + material) - W(canastilla)			1236	gr	
VOLUMEN			764	cm3	
D.S.S.S.			2.62	gr/cm3	
			2617.80	kg/m3	
PESO GRAVA SATURADA (gr)		PESO GRAVA SECA (gr)		AGUA DESALOJADA	
1061		1042.6		18.4	
				% Absorción	
				1.76	
AGREGADO FINO					
PESO VOLUMÉTRICO SUELTO			DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA		
VOLUMEN	0.00281	m3	P.S.S.S.	500	gr
P.V.S + RECIPIENTE	8.09	kg	LECTURA INICIAL	510	gr
RECIPIENTE	4.42	kg	LECTURA FINAL	698	gr
PESO	3.67	kg	W Desalojado	188	gr
P.V.S	1306.050	kg/m3	V Desalojado	188.00	cm3
D.S.S.S.			2.6596	gr/cm3	2659.57
PESO ARENA SATURADA (gr)		PESO ARENA SECA (gr)		AGUA DESALOJADA	
362.15		356.85		5.3	
				% Absorción	
				1.49	
		HUMEDAD DE ARENA		HUMEDAD DE GRAVA	
		RECIPIENTE	Z6	RECIPIENTE	LAB 42-3
		W RECIPIENTE (gr)	165.00	W RECIPIENTE (gr)	125.00
		W ARENA+ R	1565.00	W GRAVA + R	1125.00
		W ARENA SECA+ R	1508.00	W GRAVA SECA+ R	1121.00
		W de AGUA	57.00	W de AGUA	4.00
		W ARENA SECA	1343.00	W GRAVA SECA	996.00
		HUMEDAD	4.24	HUMEDAD	0.40

Anexo 23

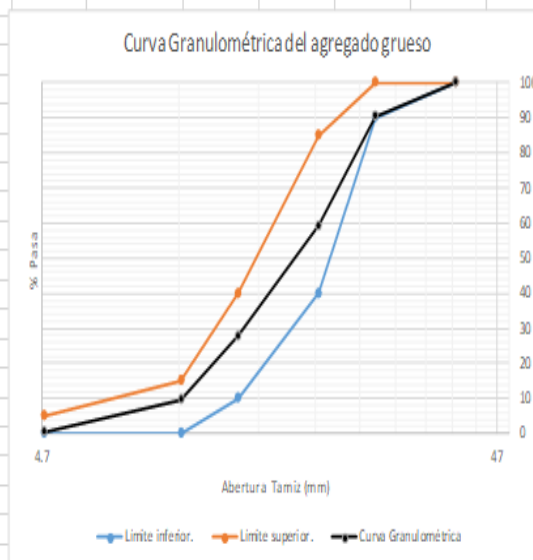
Promedio de resultados de ensayos

AGREGADO GRUESO	
PROMEDIO PESO VOLUMÉTRICO SUELTO	1282.752
PROMEDIO PESO VOLUMÉTRICO VARILLADO	1494.319
PROMEDIO D.S.S.S	2617.801
PROMEDIO % ABSORCION	1.76
AGREGADO FINO	
PROMEDIO PESO VOLUMÉTRICO SUELTO	1295.374
PROMEDIO D.S.S.S	2659.574
PROMEDIO % ABSORCION	1.49
PROMEDIO HUMEDAD DE ARENA	4.40
PROMEDIO HUMEDAD DE GRAVA	0.50

Anexo 24

Granulometría del agregado grueso

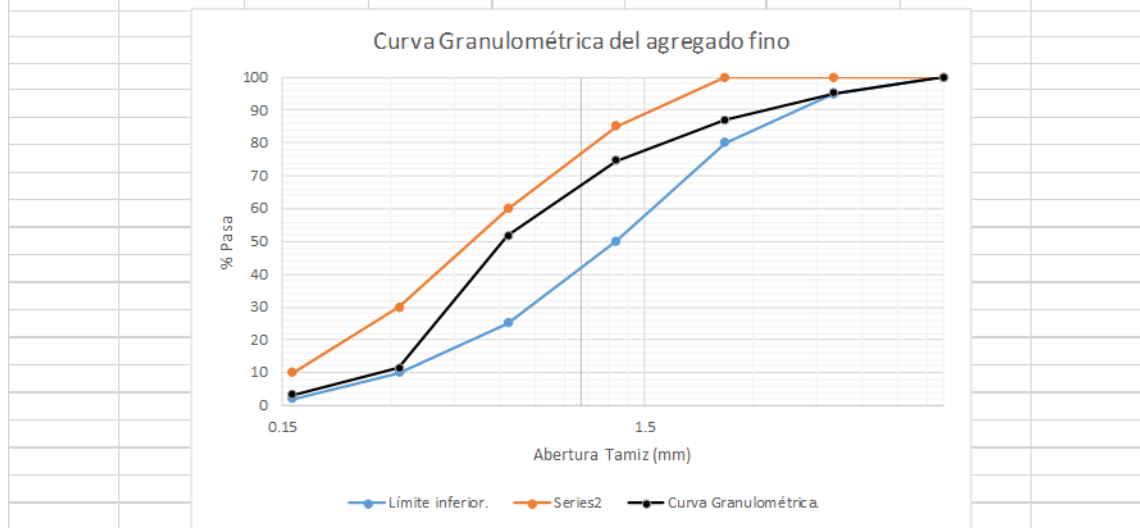
GRANULOMETRIA AGREGADO GRUESO														
Tamiz	Abertura	W Parcial	W retenida acumulada	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que Pasa	E SPECIFICACIONE S.A.S.T.M							
							N° 56		N° 57		N° 6		N° 67	
2"	50.8	0	0	0.00	0.00	100.00								
1 1/2"	38.1	0	0	0.00	0.00	100.00	100	100	100	100				
1"	25.4	827	827	9.50	9.50	90.50	90	100	95	100	100	100	100	100
3/4"	19.05	2726	3553	31.32	40.82	59.18	40	85			90	100	90	100
1/2"	12.7	2720	6273	31.25	72.08	27.92	10	40	25	60	20	55		
3/8"	9.5	1595	7868	18.33	90.40	9.60	0	15			0	15	20	55
N° 4	4.75	805	8673	9.25	99.65	0.35	0	5	0	10	0	5	0	10
N° 8	2.36	6.65	8679.65	0.08	99.727	0.273			0	5			0	5
N° 16	1.18	0.52	8680.17	0.01	99.733	0.267								
FONDO		23.24	8703.41	0.27	100.00	0.00								
TOTAL		8703.41		100.00										
Modulo de Finura		3.59												



Anexo 25

Granulometría del agregado fino

GRANULOMETRIA AGREGADO FINO								
TAMIZ	ABERTURA	W PARCIAL	W ret acumul	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIFICACIÓN A.S.T.M	
3/8"	10	0	0	0.00	0.00	100.00	100	100
Nº 4	5	65.46	65.46	4.87	4.87	95.13	95	100
Nº 8	2.5	108.77	174.23	8.09	12.96	87.04	80	100
Nº 16	1.25	168.12	342.35	12.50	25.46	74.54	50	85
Nº 30	0.63	305.53	647.88	22.72	48.18	51.82	25	60
Nº 50	0.315	544	1191.88	40.45	88.63	11.37	10	30
Nº 100	0.16	108.53	1300.41	8.07	96.70	3.30	2	10
FONDO		44.38	1344.79	3.30	100.00	0.00	0	0
TOTAL		1344.79		100.00				
Modulo de Finura		2.77						



Anexo 26

Resumen de datos del agregado fino y grueso

RESUMEN DE DATOS		
Peso específico del cemento	2950	kg/m ³
ARENA		
Módulo de finura de la arena	2.77	
Peso volumetrico de la arena	1295.37	kg/m ³
D.S.S.S. de la arena	2659.57	Kg/m ³
Absorción de la arena	1.49	%
Humedad de la arena	4.40	%
GRAVA		
Peso volumetrico suelto de la grava	1282.75	kg/m ³
Peso volumetrico varillado de la grava	1494.32	kg/m ³
D.S.S.S. de la grava	2617.80	kg/m ³
Tamaño máximo NOMINAL de la grava	25.4	mm
Absorción de la grava	1.76	%
Humedad de la grava	0.50	%

Anexo 27

Resistencia requerida y selección de revenimiento

DISEÑO DE HORMIGÓN CALIZAS HUAYCO Y ARENA GRUESA DEL CANTÓN MILAGRO							
F'c	210	Desviación	84		Revenimiento	10.00	cm
F'c (sin aire)	294	kg/cm ²					
F'c (con aire)	0	kg/cm ²					

Anexo 28

Cálculo de cantidad de agua y Relación A/C

AGUA			
Tamaño máximo de la grava		Aire atrapado	
25.4	mm	1.5	%
CANTIDAD DE AGUA			
193	kg/m ³		
Relación a/c	0.552		
CANTIDAD DE CEMENTO			
349.64	kg/m ³		

Anexo 29

Cálculo de cantidad del agregado grueso

AGREGADO GRUESO			
Tabla 6.3.6.	MF arena	P.V.V.	
0.673	2.77	1494.32	kg/m ³
CANTIDAD DE GRAVA			
1005.68	kg/m ³		

Anexo 30

Cálculo de cantidad del agregado fino

AGREGADO FINO						
	W (kg)	D (kg/m3)	V (m3)	Correccion 60-40 de agregados		
Agua	193	1000	0.193	Agreg.Total	1775.12	kg
Cemento	349.64	2950	0.119	Arena	710.05	kg
Grava	1005.68	2617.80	0.384	Grava	1065.07	kg
Arena	769.44	2659.57	0.289			
Aire	0	0	0.015			
			1.000			

Anexo 31

Corrección por humedad y absorción

	CORRECCION POR HUMEDAD Y ABSORCION					Diferencia	W (kg)	D (kg/m3)	V (m3)	% propor V
	Humedad		Absorción							
	W (kg)	%	kg	%	kg					
AIRE								0.015	1.5	
CEMENTO	349.64					349.64	2950	0.119	11.9	
GRAVA	1005.68	0.50	5.05	1.76	-17.75	-12.69	992.98	2617.80	0.379	38.2
ARENA	769.44	4.40	33.85	1.49	-11.43	22.43	791.87	2659.57	0.298	30.0
AGUA	193		-38.91		29.18	9.73	183.27	1000	0.183	18.4
TOTAL	2317.76	Para un metro cúbico					2317.76		0.994	100.0

Anexo 32

Datos para fundición de cilindros y desperdicio

Datos cilindro			
Pi	3.14156		
Radio	0.075	m	
A= Pi*r^2	0.01767128	m2	
h	0.3	m	
V cilindro	0.00530138	m3	
# cilindros	12	unidades	
VolumenCilind	0.064	m3	
Volumen testigos		0.064	m3
Desperdicio	10%	0.0064	m3
Volumen requerido a fundir		0.070	m3

Anexo 33

Dosificación para hormigón patrón

0% DE METAKAOLIN					
PARA FUNDIR TESTIGOS					
	Vfundir(m3)	% propor V	Vol material	D (kg/m3)	Kg (Pesar)
AIRE	-	1.5	0.001056	-	-
CEMENTO	-	11.9	0.008345	2950	24.62
GRAVA	-	38.17	0.026708	2617.80	69.92
% Metakaolin	-	0.0	0.000000	-	0.00
ARENA	-	30.0	0.020964	2659.57	55.76
AGUA	-	18.4	0.012904	1000	12.90
TOTAL	0.070	100.0	0.069978	-	163.20

Anexo 34

Dosificación para hormigón con 5% de MK

5% DE METAKAOLIN					
PARA FUNDIR TESTIGOS					
	Vfundir(m3)	% propor V	Vol material	D (kg/m3)	Kg (Pesar)
AIRE	-	1.5	0.00105617	-	-
CEMENTO	-	11.9	0.00834523	2950	23.39
GRAVA	-	38.2	0.03	2617.80	69.92
% Metakaolin	-	5	0.00349891	-	1.23
ARENA	-	30.0	0.02	2659.57	55.76
AGUA	-	18.4	0.01290404	1000	12.90
TOTAL	0.070	105.0	0.07347716	-	163.20

Anexo 35

Dosificación para hormigón con 10% de MK

10% DE METAKAOLIN					
PARA FUNDIR TESTIGOS					
	Vfundir(m3)	% propor V	Vol material	D (kg/m3)	Kg (Pesar)
AIRE	-	1.5	0.00105617	-	-
CEMENTO	-	11.9	0.00834523	2950	22.16
GRAVA	-	38.2	0.03	2617.80	69.92
% Metakaolin	-	10	0.01	-	2.46
ARENA	-	30.0	0.02	2659.57	55.76
AGUA	-	18.4	0.01290404	1000.00	12.90
TOTAL	0.070	110.0	0.07697607	-	163.20

Anexo 36

Dosificación para hormigón con 15% de MK

15% DE METAKAOLIN					
PARA FUNDIR TESTIGOS					
	Vfundir(m3)	% propor V	Vol material	D (kg/m3)	Kg (Pesar)
AIRE	-	1.5	0.00105617	-	-
CEMENTO	-	11.9	0.00834523	2950	20.93
GRAVA	-	38.2	0.03	2617.80	69.92
% Metakaolin	-	15	0.01	-	3.69
ARENA	-	30.0	0.02	2659.57	55.76
AGUA	-	18.4	0.01290404	1000	12.90
TOTAL	0.070	115.0	0.08047499	-	163.20

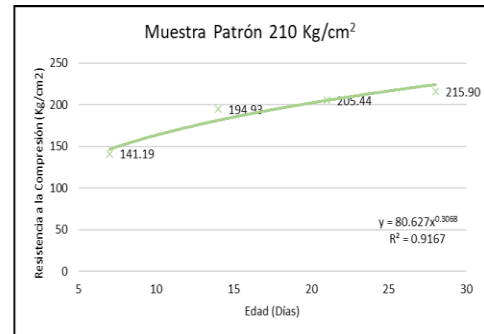
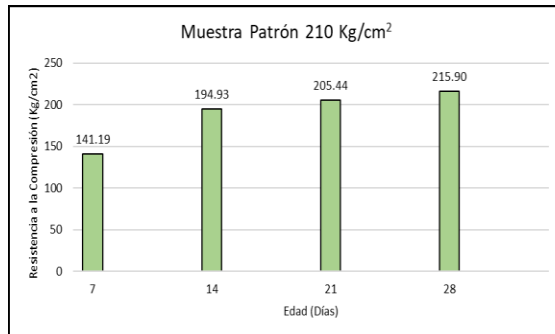
Anexo 37

Dosificación para hormigón con 20% de MK

20% DE METAKAOLIN					
PARA FUNDIR TESTIGOS					
	Vfundir(m3)	% propor V	Vol material	D (kg/m3)	Kg (Pesar)
AIRE	-	1.5	0.00105617	-	-
CEMENTO	-	11.9	0.00834523	2950	19.69
GRAVA	-	38.2	0.03	2617.80	69.92
% Metakaolin	-	20	0.01	-	4.92
ARENA	-	30.0	0.02	2659.57	55.76
AGUA	-	18.4	0.01290404	1000	12.90
TOTAL	0.069978	120.0	0.0839739	-	163.20

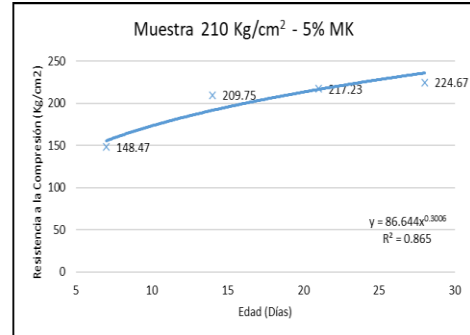
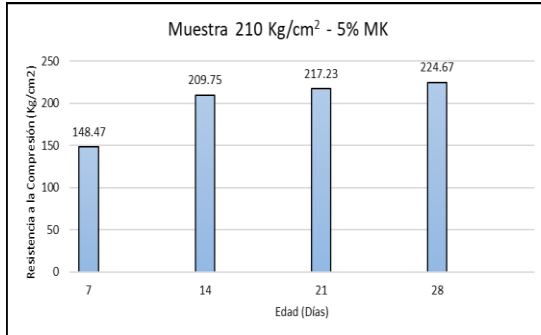
Anexo 38

Resistencia de cilindros patrón con su respectiva curva



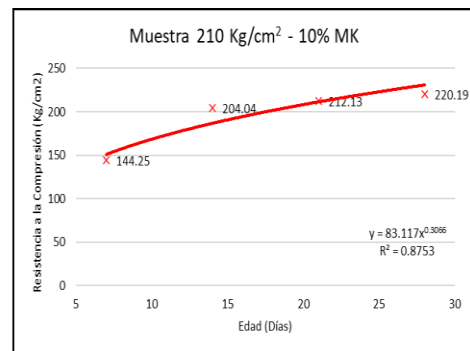
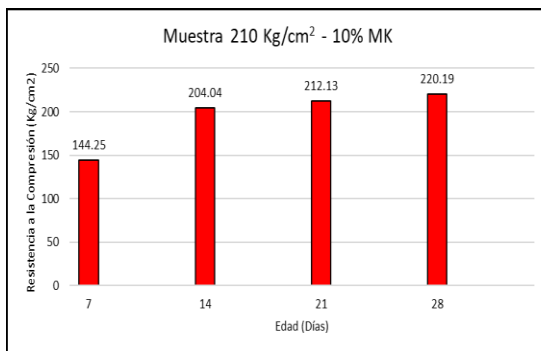
Anexo 39

Resistencia de cilindros con 5% de MK con su respectiva curva



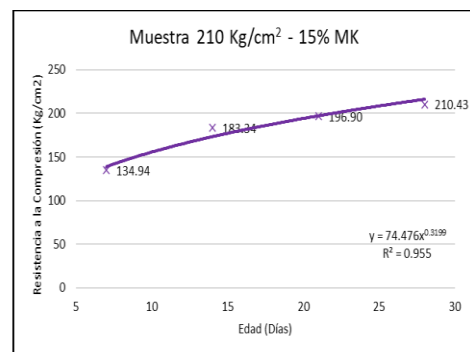
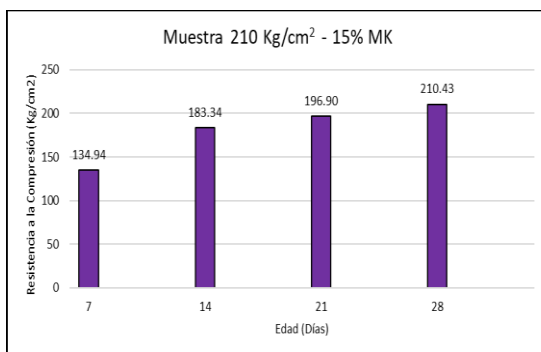
Anexo 40

Resistencia de cilindros con 10% de MK con su respectiva curva



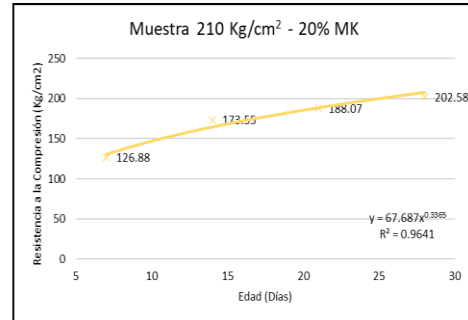
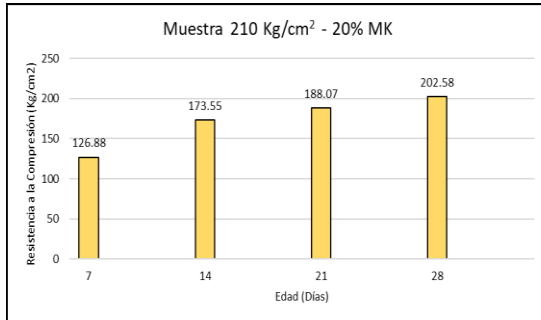
Anexo 41

Resistencia de cilindros con 15% de MK con su respectiva curva



Anexo 42

Resistencia de cilindros con 20% de MK con su respectiva curva



Anexo 43

Análisis de varianza de un solo tipo para probetas de hormigón a 7 días de curado

Análisis de Varianza									
Resistencia a los 7 días de un hormigón de 210 kg/cm ²									
Porcentaje de MK	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)								
	1	2	3	Total	Promedio	∑ y ² _{ij}		∑ y ² _{i.}	
0%	141.23	140.00	142.35	423.58	141.19	19945.4751	19601.35	20263.56	179422.88
5%	152.04	143.27	150.10	445.40	148.47	23115.3315	20525.68	22529.96	198385.58
10%	144.39	145.10	143.27	432.76	144.25	20848.3335	21054.97	20525.68	187281.81
15%	135.93	135.52	133.38	404.82	134.94	18475.8802	18365.16	17789.36	163879.96
20%	122.06	122.06	136.54	380.65	126.88	14898.1773	14898.18	18642.58	144897.48
				2087	139.15				
				$SS_T = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 y_{ij}^2 - \frac{y_i^2}{N} = 1046.08505$					
				$SS_{Tratamientos} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 y_i^2 - \frac{y_i^2}{N} = 855.651324$		$F_0 = \frac{SS_{Tratamientos} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E} = 11.2329281$			
				$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos} = 190.4337$					
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀	Valor P	F _{crit}			
Tratamientos	855.6513239	4	213.912831	11.23292807	0.00101761	3.48			
Error	190.4337	10	19.0433723						
Total	1046.0850	14							

Anexo 46

Análisis de varianza de un solo tipo para probetas de hormigón a 28 días de curado

Análisis de Varianza									
Resistencia a los 28 días de un hormigón de 210 kg/cm ²									
Porcentaje de MK	Resistencia a la Compresión(Kg/cm ²)								
	1	2	3	Total	Promedio	\bar{y}^2_{ij}			$\bar{y}^2_{i.}$
0%	219.03	215.97	212.71	647.71	215.90	47974.8243	46644.10	45245.30	419532.70
5%	225.97	223.62	224.44	674.02	224.67	51060.4162	50006.00	50371.50	454305.25
10%	224.13	213.22	223.21	660.56	220.19	50234.2838	45462.46	49823.74	436341.71
15%	209.75	208.43	213.12	631.30	210.43	43996.0232	43441.68	45418.98	398534.98
20%	201.39	206.29	200.07	607.74	202.58	40558.2342	42553.63	40026.06	369349.37
				3221	214.76				

$$SS_T = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} = 1017.60872$$

$$SS_{\text{Tratamientos}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^5 y_i^2 - \frac{y_{..}^2}{N} = 888.369989$$

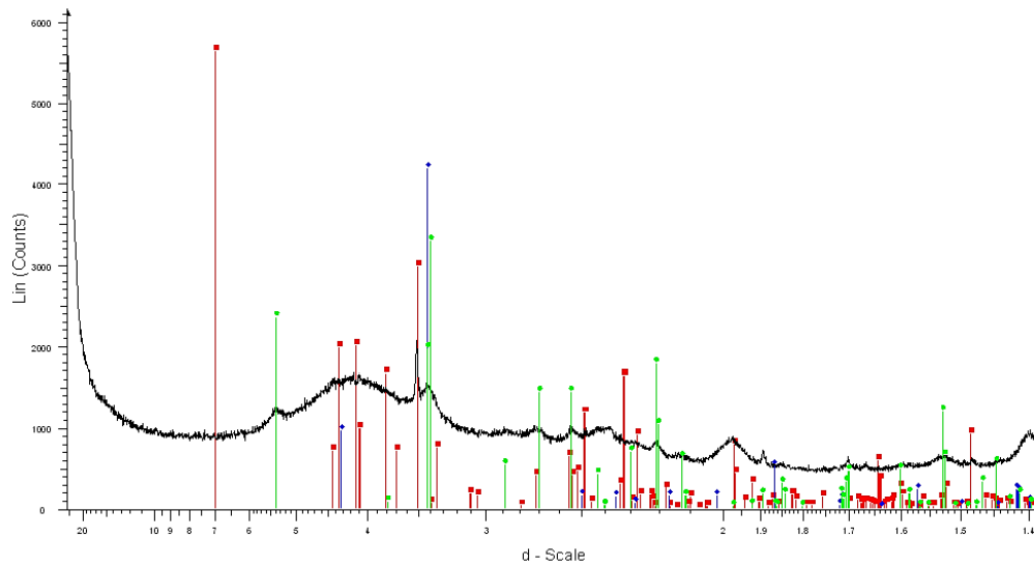
$$F_0 = \frac{SS_{\text{Tratamientos}} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{\text{Tratamientos}}}{MS_E} = 17.1846707$$

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Tratamientos}} = 129.2387$$

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀	Valor P	F _{crit}
Tratamientos	888.369989	4	222.092497	17.18467067	0.00017727	3.48
Error	129.2387	10	12.9238728			
Total	1017.6087	14				

Anexo 47

Diagrama de barrido microscópico "Análisis de difracción de Rayos X (DRX)" del KaMin 70C



Nota: Roja caolinita, verde mullita y azul cuarzo, tomado de Rocha (2017, p. 59)