



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TEMA:

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO
SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS
EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA.

AUTOR: RODRÍGUEZ GUEVARA ROBERTO CARLOS

TUTORA: ING. M.SC. MARITZA UREÑA

Ambato – Ecuador

2016

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. M.Sc. Maritza Ureña certifico que la presente tesis de grado “COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA.” realizado por el Sr. Roberto Carlos Rodríguez Guevara, Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato, se desarrolló bajo mi supervisión y tutoría, siendo un trabajo elaborado de manera personal.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Ambato, junio de 2016

Ing. M.Sc. Maritza Ureña

AUTORÍA DEL TRABAJO

Yo, Roberto Carlos Rodríguez Guevara, CI. 1600449324 Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, tengo a bien indicar que los criterios emitidos en el presente trabajo de graduación como tema: **“COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”** como también los contenidos presentados son de mi completa autoría.

Ambato, junio de 2016

Roberto Carlos Rodríguez Guevara

AUTOR

APROBACIÓN PROFESORES CALIFICADORES

Los suscritos Profesores Calificadores, una vez revisado, aprueban el informe de Investigación, sobre el tema: " COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA.", del Sr. Egresado Roberto Carlos Rodríguez Guevara, de la carrera de Ingeniería Civil, el mismo que guarda conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por el Centro de Estudios de Pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, julio de 2016

Para constancia firman.

Ing. Mg. Carlos Navarro

PROFESOR CALIFICADOR

Ing. Mg. Diego Chérrez Gavilanes

PROFESOR CALIFICADOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de éste trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste trabajo experimental dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, junio de 2016

AUTOR

Roberto Carlos Rodríguez Guevara

DEDICATORIA

A nuestro sabio Dios, porque sin El nada es posible, al que nos fortalece cuando nos sentimos derrotados, a nuestro guía y amigo incondicional, por ayudarme a concluir una etapa más en mi vida a pesar de tantas piedras que encontré en este camino.

A mis padres por ese apoyo incondicional, ya que a pesar de las difíciles situaciones que hemos vivido ellos con esas palabras de aliento ayudaron a que todo lo que he logrado sea posible.

Dedico también este trabajo a mis hermanos, tías, tíos, primos, primas por apoyarme en todo momento que yo he necesitado de ellos.

A toda mi familia en general, gracias por sus consejos, esas palabras de aliento que hacen que no desmayemos y levantemos nuestro ánimo para seguir y lograr la meta que me he planteado.

Roberto

AGRADECIMIENTO

Es a ÉL a quién y por quien he logrado todo, gracias Dios Todo Poderoso por darme lo más importante, salud y vida, así como también la sabiduría necesaria para entender las cosas que se me han hecho difíciles.

Gracias a mis padre, Ángel y Luz María que a pesar de los problemas que han tenido han hecho posible que yo saliera adelante brindándome la oportunidad de que a ellos les ha sido negada, gracias mami por estar siempre a mi lado a pesar de todo y apoyándome siempre, buscando ese recurso de donde sea, todo lo que he logrado en gran parte ha sido por ella.

Gracias a mis hermanos, Mary, Yoly, Hector por ayudarme siempre que he necesitado de ustedes.

Agradezco también a mis tías, María, Editha, Enma, Eli, y todas que desde el principio confiaron en mí y me brindaron su apoyo, gracias por sus consejos que me han servido de mucho. Dios le pague tía Editha por ese gran apoyo.

También agradezco a mis abuelitos, Juan y Matilde, gracias por ayudarme también con lo que han podido.

Gracias primos, Nanci, Moni, Fabri, Kary, David, More que cuando he necesitado de algún consejo han estado en ese momento.

Gracias mi vida, Johita Núñez por ese apoyo de siempre y nunca dejar que decaiga mis ánimos y por tanto apoyo en la universidad y durante la tesis.

Don Luis, Sra. Carmita, Jorge, Albert, gracias por sus palabras de aliento siempre.

Amigos como no agradecerles, Andrés, Nathy, Kari, José (JP), Cristian, Gemelos, Germa, Adry a todos, quienes me alentaban siempre para continuar con este proceso y por esos consejos, por todo mil gracias.

Gracias Inge. Maritza Ureña por la ayuda prestada durante todo el desarrollo de éste trabajo.

Roberto

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

A. PÁGINAS PRELIMINARES

PORTADA.....	I
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA DEL TRABAJO.....	III
APROBACIÓN PROFESORES CALIFICADORES.....	III
APROBACIÓN PROFESORES CALIFICADORES.....	IV
DERECHOS DE AUTOR.....	V
DEDICATORIA.....	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
INDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XII
RESUMEN EJECUTIVO.....	XIV

B. TEXTO

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Tema de Investigación:.....	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Justificación.....	2
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General:.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos:.....	4
CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN.....	5
2.1. Fundamentación teórica.....	5
2.2. Hipótesis.....	20
2.3. Señalamiento de variables.....	20
2.3.1. Variable independiente.....	20
2.3.2. Variable dependiente.....	20
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Nivel o tipo de investigación.....	21
3.2. Población y muestra.....	21

3.3.	Operacionalización de variables	22
3.3.1	Variable Independiente	22
3.3.2	Variable Dependiente.....	23
3.4.	Plan de recolección de información	24
3.5.	Plan procesamiento y análisis	25
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		26
4.1.	Recolección de datos.....	26
4.1.2.	Ensayos realizados al cemento y metacaolín	32
4.1.3.	Dosificación del Hormigón.....	34
4.1.4.	Porcentaje de Metacaolín empleado en el Hormigón	40
4.2.	Análisis de resultados	41
4.2.1.	Determinación de propiedades del hormigón en estado fresco $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. .	41
4.2.2.	Comportamiento a compresión de cilindros de hormigón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	43
4.2.3.	Análisis de Precios.....	54
4.3.	Verificación de la hipótesis.....	56
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		57
5.1.	Conclusiones	57
5.2.	Recomendaciones	58
C. MATERIALES DE REFERENCIA		59
1.	Bibliografía	59
2.	Anexos	62
2.1	Fotografías del desarrollo de la investigación.....	62
2.2	Especificaciones del caolín	67
2.3	Artículo Técnico	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades Físicas, Composición y Estructura.....	5
Tabla 2. Composición química de algunos materiales puzolánicos.	10
Tabla 3. Tamaño de tamices.....	12
Tabla 4. Operacionalización de la variable independiente	22
Tabla 5. Operacionalización de la variable dependiente	23
Tabla 6. Recolección de la información	24
Tabla 7. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso. (Trituradora Zúñiga)	27
Tabla 8. Análisis Granulométrico del Agregado Fino. (Trituradora Zúñiga).....	28
Tabla 9. Densidad real suelta del agregado grueso y fino. (Trituradora Zúñiga).....	29
Tabla 10. Densidad real compactada agregado grueso y fino. (Trituradora Zúñiga)	29
Tabla 11. Densidad real compactada de la muestra. (Trituradora Zúñiga)	30
Tabla 12. Densidad real del ripio. (Trituradora Zúñiga)	31
Tabla 13. Densidad real de la arena. (Trituradora Zúñiga).....	31
Tabla 14. Densidad real del cemento.	32
Tabla 15. Densidad real del metacaolín.	32
Tabla 16. Capacidad de absorción del ripio. (Trituradora Zúñiga)	33
Tabla 17. Capacidad de absorción de la arena. (Trituradora Zúñiga)	33
Tabla 18. Capacidad de absorción del metacaolín.	34
Tabla 19. Cantidad de pasta para diferentes asentamientos	35

Tabla 20. Relación Agua / Cemento (W/C)	35
Tabla 21. Dosificación por el método de la densidad óptima.	38
Tabla 22. Corrección de la dosificación	39
Tabla 23. Propiedades del Hormigón en estado fresco - Hormigón simple y Hormigón añadido metacaolín.....	41
Tabla 24. Propiedades del Hormigón en estado fresco - Hormigón simple y Hormigón añadido metacaolín.....	42
Tabla 25. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 7 días de edad.	43
Tabla 26. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 14 días de edad.	44
Tabla 27. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 28 días de edad.....	45
Tabla 28. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 60 días de edad.....	46
Tabla 29. Resumen de esfuerzos obtenidos.....	47
Tabla 30. Resumen de esfuerzos obtenidos.....	48
Tabla 31. Resumen de esfuerzos obtenidos.....	49
Tabla 32. Resumen de esfuerzos obtenidos.....	50
Tabla 33. Esfuerzos a diferentes edades de curado.	52
Tabla 34. Hormigón Convencional	54
Tabla 35. Hormigón Añadido Metacaolín.....	55

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Compresión de cilindros a los 7 días de curado	47
Gráfico 2. Compresión de cilindros a los 14 días de curado	48

Gráfico 3. Compresión de cilindros a los 28 días de curado	49
Gráfico 4. Compresión de cilindros a los 60 días de curado.	50
Gráfico 5. Resultado general del ensayo a compresión de los cilindros de hormigón simple y hormigón con metacaolín comparado con los límites establecidos para diferentes días de curado.....	51
Gráfico 6. Resistencia vs Tiempo (curado)	52
Gráfico 7. Resumen de las resistencias alcanzadas en los diferentes días de curado.	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. El caolín.....	6
Ilustración 2. Espacios que ocupa el metacaolin en la mezcla	7
Ilustración 3. Representación del concepto de la relación agua/cemento efectiva.	8
Ilustración 4. Molde Cilíndrico	16
Ilustración 5. Comportamiento de los cilindros a la compresión a diferentes días de curado.....	16
Ilustración 6. Módulos con respecto a la gráfica esfuerzo-deformación hormigón.....	18
Ilustración 7. Deformaciones longitudinales, transversales y volumétricas de una probeta sometida a carga axial.	19

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	8
Ecuación 2.....	8
Ecuación 3.....	12
Ecuación 4	17

Ecuación 5	17
Ecuación 6	18
Ecuación 7	20
Ecuación 8	35
Ecuación 9	35
Ecuación 10	36
Ecuación 11	37
Ecuación 12	37
Ecuación 13	37
Ecuación 14	37
Ecuación 15	37
Ecuación 16	39
Ecuación 17	39
Ecuación 18	40
Ecuación 19	40

RESUMEN EJECUTIVO

TEMA: “COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA.”

AUTOR: Roberto Carlos Rodríguez Guevara

TUTOR: Ing. Mg. Maritza Ureña

FECHA: Junio 2016

Definida la planificación para ejecutar este trabajo experimental, primeramente se realizó el análisis de las propiedades físicas del agregado fino (arena) y del grueso (ripió) adquiridos de la Trituradora Zúñiga que está ubicada en la Parroquia Madre Tierra, Provincia de Pastaza, la planta obtiene los materiales del Río Pastaza, y los productos para el ensayo presentaron las características establecidas que se requieren.

Posteriormente se obtuvo el caolín que presentó las características similares a las mencionadas en algunos estudios que ya se han hecho en otros países con este material.

Las características de todos los componentes que conforman el hormigón fueron determinadas y se realizó la dosificación utilizando el Método de la Densidad Óptima para conseguir hormigones de resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y un asentamiento de 6 - 9 cm, ya que este hormigón con esa resistencia es considerado un hormigón estructural y es el que más se ha utilizado en el campo de la construcción.

En la elaboración de los hormigones, se hicieron probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón añadido diferentes porcentajes de metacaolín para compararlos.

Para determinar la factibilidad de realizar este tipo de hormigones añadidos metacaolín, se realizaron los respectivos ensayos de laboratorio, necesarios para determinar las propiedades físicas y mecánicas del concreto en estado fresco así como en estado endurecido.

Para finalizar, se analizaron los resultados y se logró determinar el porcentaje adecuado que se utiliza para que el hormigón presente una mejoría en sus propiedades mecánicas, considerando que al ser un buen hormigón no debe perder resistencia.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Tema de Investigación:

“COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”

1.2. Antecedentes

Los materiales cementantes han sido utilizados desde la antigüedad, la civilización romana fue la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer, se usaban a manera de pastas o morteros hechos con arcillas, yeso o cal para unir mampuestos en las construcciones. Luego la Antigua Civilización Griega con la extracción de cementos naturales de la Isla de Santorini hasta llegar a la fabricación del cemento usado en estos días. ^[1]

Los minerales silico-aluminosos (caolín), son los más abundantes en la naturaleza ^[2] los mismos que tienen la característica de funcionar como un material cementante y que cuando se emplean como aditivos minerales en el hormigón pueden mejorar la resistencia y la durabilidad de dicho material. ^[3]

El Metacaolín se ha investigado en las últimas décadas en todo el mundo, debido a su composición química, $Al_2Si_2O_7$, y a su estructura cristalina amorfa. Es un material cementante suplementario, debido a que es un aluminosilicato activado térmicamente, obtenido al calcinar el caolín a temperaturas de $550^{\circ}C$ y $1050^{\circ}C$ ^[2]; a esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina, es decir, al perder agua por la acción térmica se destruye la estructura cristalina del caolín. (Enlaces Van der Waals). ^[4]

En 1980, en Noruega se reportó la utilización del “humo de sílice”, como material ligante suplementario en la preparación de hormigones, allí se ve al hormigón presentar características especiales y nace la idea de su utilización, pero gracias a los aportes de otros autores (Caldarone, 1994; Barata y Dal Molin, 2002) afirman que el también el matacaolín puede reemplazar al humo de sílice y presenta ventajas respecto a este.

Otros materiales con características cementantes como las cenizas volantes y la escoria se las han utilizado también como material ligante, pero se ha comprobado que presentan menos efectividad que el humo de sílice y el metacaolín, estos materiales están considerados como puzolanas de alta reactividad, ^[4] razón por la cual se las considera su utilización apta en la industria de la construcción.

En el siglo XX se verificó un aumento en la utilización de aditivos y adiciones por parte de la Industria del cemento, estimándose que la tasa de consumo continúe aumentando debido principalmente al desarrollo de superplastificantes y superpuzolanas tales como el Metacaolín. ^[2]

En los hormigones la presencia de aditivos ayuda a mejorar significativamente la trabajabilidad y durabilidad, y en este proyecto se plantea una reducción de aditivos al utilizar un aditivo puzolánico el metacaolín como sustituto parcial del cemento, que cumpla la misma función.

Después de años durante los cuales el hormigón de alta resistencia (hormigón con adiciones puzolánicas), fue apenas considerado como un nuevo material con un futuro limitado a la construcción de columnas en edificios altos o en plataformas marítimas, es ahora visto como un tipo hormigón de alta calidad, cuyas aplicaciones son crecientes tanto en volumen como en diversidad.

Hoy en día este hormigón (puzolánico) se ha convertido en un material de ingeniería de alta tecnología, cuyas propiedades, desempeño y posibilidades continuarán dejándonos maravillados. Siendo la durabilidad el factor que se consolida cada vez más como indispensable para las obras de ingeniería civil. ^[5]

1.3. Justificación

El hormigón elaborado con aditivos puzolánicos es común, razón por la cual se plantea la idea de utilizar una puzolana (caolín) que sustituya en cierto porcentaje al cemento, si bien es cierto es un material desconocido en el medio constructivo en nuestro país de una forma técnica, pero existen razones que justificarían su empleo estructural así como también considerando la cantidad de este material que existe en nuestro país.

Es así que se plantea esta investigación ya que en los últimos años ha crecido el interés por la utilización y el comportamiento de nuevos materiales que ayuden a resolver algunos problemas que presentan los hormigones en el campo de la construcción y es por ello que se propone utilizar metacaolín.

Gracias al aporte de investigaciones realizadas, se han generado varias ideas, las mismas que han ayudado a la creación de nuevos procesos de construcción y fabricación de distintos materiales que hacen que los hormigones añadidos metacaolín aumenten algunas de sus propiedades mecánicas.

Según estudios realizados el caolín es considerado un material que tiene el doble de reactividad que cualquier otra puzolana y en su transformación a Metacaolín se lo considera un material cementante suplementario y se lo emplea para la fabricación de concretos especiales.^[2]

Para esta investigación se hizo necesario obtener suficiente información para conocer el comportamiento mecánico del hormigón al reemplazar uno de sus componentes (cemento por metacaolín), determinar la influencia sobre sus propiedades mecánicas y al mismo tiempo establecer los porcentajes adecuados de metacaolín que se puede añadir a las muestras para tener un buen hormigón.

Es necesario considerar alguna de las ventajas que nos proporciona la utilización del metacaolín como: Resistencia a la compresión alta^[3], la durabilidad respecto del hormigón común, y su coloración (caolín blanco), permite que se lo utilice para aplicaciones especiales en la rama de la arquitectura.

Los materiales cementantes suplementarios por sí mismo poseen muy poco o ningún valor cementante, pero que en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente, y adquieren propiedades cementantes y hacen que el hormigón mejore su desempeño en su estado fresco y endurecido.

En la actualidad se le está dando un elevado grado de importancia al medio ambiente y como es de conocimiento el impacto ocasionado en la fabricación de cemento es de consideración por las emisiones de CO₂ a la atmósfera, a diferencia de la utilización de caolín que en su transformación a metacaolín utiliza procesos que ocasionan menor daño al medio ambiente.^[2]

Además que en la elaboración del cemento existe un alto consumo energético, este es de un 35-40% de la energía eléctrica y de un 75-85% de los combustibles fósiles necesarios para la producción de una tonelada de cemento, a diferencia de la producción del metacaolín, que es de cerca del 7% de las emisiones mundiales de CO₂ de origen antropogénico y del 5% del consumo de energía en el sector industrial. ^[1]

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

Determinar el comportamiento del hormigón añadido metacaolín como sustituto del cemento, utilizando agregados existentes en la Provincia de Pastaza.

1.4.2. Objetivos Específicos:

- ✓ Analizar el comportamiento a compresión del hormigón mejorado con metacaolín como sustituto parcial del cemento.
- ✓ Determinar la variación de las propiedades; trabajabilidad, consistencia y homogeneidad del hormigón de resistencia a la compresión de 210 kg/cm², incorporado diferentes porcentajes de metacaolín.
- ✓ Determinar la utilización que se le ha dado al caolín como un aditivo puzolánico.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN

2.1. Fundamentación teórica

Cemento

Es el resultado de mezclar caliza y arcilla calcinadas y luego molidas, más otras adiciones, este producto al contacto con el agua se endurecerse. El tamaño de sus partículas varía entre una micra (0.001 mm) y 80 micras (0.080 mm) de diámetro. [6]

En cuanto se refiere a la finura del cemento, se dice que cuanto mayor sea la finura, el cemento se hidrata y adquiere resistencia rápidamente y también la disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada es mayor, lo cual es ventajoso para la cohesión (grados de unión y adherencia entre sus componentes), manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de concreto. [7]

Tipos de Cementos:

- Cemento Portland
- Cemento Portland con adiciones
- Cemento Portland con escorias de horno alto
- Cemento puzolánico
- Cemento compuesto [8]

Caolín

Es un silicato de aluminio hidratado, principalmente se lo obtiene de la descomposición de rocas feldespáticas. El término caolín describe a las arcillas en las que predomina el mineral caolinita.

Tabla 1. Propiedades Físicas, Composición y Estructura

TABLA I. PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DEL CAOLÍN	
COLOR	BLANCO, GRIS O AMARILLENTO
ASPECTO	UNTUOSO AL TACTO
BRILLO	TERROSO MATE O NACARADO CUANDO ES CRISTALINO
RAYA	BLANCA
DENSIDAD	2,40 - 2,64 g/cm ³
DUREZA	2 - 2,5

Fuente: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. [9]

Otras propiedades relevantes es su inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable y de fácil extrusión; resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene elevada refractariedad y facilidad de dispersión. Es compacto, suave al tacto y difícilmente fusible. Tiene gran poder cubriente y absorbente y baja viscosidad en altos porcentajes de sólidos.^[9] Las especies mineralógicas comúnmente presentes son principalmente caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), alunita ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), feldespato potásico (KAlSi_3O_8) y cuarzo (SiO_2) (Kakali et al., 2001), conformada de una lámina de tetraedros de sílice y una de octaedros de alúmina.

Ilustración 1. El caolín



Fuente: QuimiNet-El Caolín^[10]

Cemento puzolánico

Aquellos formados por clínker de portland y material puzolánico (puzolana natural, cenizas volantes o el humo de sílice).^[11]

Puzolana

Es un producto que puede ser de origen: natural, volcánico, no volcánico, y artificial, este producto finamente dividido no posee ninguna propiedad hidráulica, pero contiene constituyentes (sílice y alúmina) capaces de fijar cal a temperatura ambiente en presencia de agua, formando compuestos de propiedades hidráulicas, tales como:

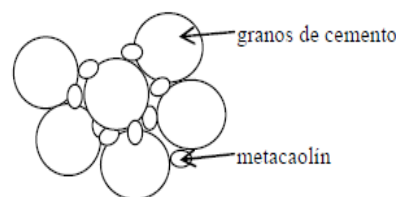
- **Humo de sílice:** Es un subproducto de la obtención del silicio y del ferrosilicio. Se lo obtiene al reducir en un horno eléctrico cuarzo muy puro y carbón, recogiendo del humo generado, mediante filtro electrostático, estas son partículas de muy pequeño diámetro formadas principalmente por sílice muy reactiva.
- **Metacaolín:** Es un aluminio-silicato producido por la calcinación de la caolinita o caolín puro o natural, en un rango de temperatura controlado de 650 a 800

°C, que permite su deshidroxilación y, por lo tanto, la obtención de un producto con una altas propiedades cementantes.

Es un derivado de la calcinación de arcillas caoliníticas y está constituido básicamente por compuestos a base de sílica (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) en fase amorfa.

Siendo un polvo muy fino, tiene como una de sus finalidades situarse entre los granos de cemento, llenando los vacíos dejados por estos (efecto filler).^[11]

Ilustración 2. Espacios que ocupa el metacaolín en la mezcla



Fuente: Elaboración de hormigones de alta resistencia utilizando metacaolín^[12]

La otra finalidad del Metacaolín (MC), aún más importante, es la reacción con la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberada por el cemento en su hidratación), conocida como reacción Puzolánica.

A la hora de realizar evaluaciones de la reacción puzolánica de un material se deben fijar algunos parámetros: tiempo de curado, temperatura de curado, relación agua/cemento, proporción de puzolana en el conglomerante, y tipo de cemento.

En los últimos años, ha existido un creciente interés en determinar lo que se conoce como factor de eficacia cementante o factor k ,^[13] que viene a ser un número que caracteriza a un material puzolánico y que determina la equivalencia entre la puzolana y el cemento desde el punto de vista cementante y de su consecuencia en el desarrollo de la resistencia mecánica. Realmente, no se puede definir un valor de factor k para cada material, sino que dicho valor de factor k depende de la relación agua/cemento, temperatura de curado, proporción cemento/puzolana, edad de curado y tipo de cemento, entre otros parámetros. Sin embargo, resulta interesante conocer la equivalencia, o al menos una tabla o gráfico de equivalencia entre la capacidad cementante del cemento y la capacidad puzolánica cementante de la puzolana en presencia de ese cemento.^[13]

Por tanto, la adición de una puzolana en un conglomerante supone una reducción en la relación “agua/cemento efectiva”, de modo que si vemos la variación de la resistencia mecánica de hormigones de cemento es ($\varphi=0$) con la relación agua/cemento, y hormigones con cierta proporción de puzolana ($\varphi = \varphi_p$), podemos ver que dos hormigones con la misma resistencia mecánica (R_φ), tendrán relaciones agua/cemento diferentes, ω y ω_p respectivamente, por lo que la relación “agua/cemento efectiva”, ω_φ para el conglomerado con puzolana es igual a:

Ecuación 1.

$$\omega_\varphi = \frac{\omega}{1 + k_\varphi}$$

Donde k es el factor de eficacia cementante y φ la relación entre puzolana y cemento. De ese modo, el valor de k viene dado por:

Ecuación 2.

$$k = \frac{\omega - \omega_\varphi}{\varphi \omega_\varphi}$$

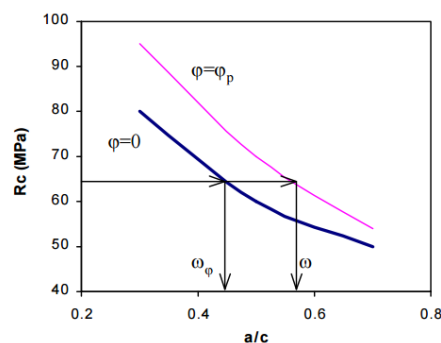
Por tanto, k podrá tener valores:

k>1 La cantidad de puzolana que se debe añadir es inferior a la que se retira de cemento

k=1 Debe ser sustituido el cemento con la misma cantidad en peso de puzolana

k<1 Se debe añadir más cantidad de puzolana que de cemento retirado.

Ilustración 3. Representación del concepto de la relación agua/cemento efectiva.



Fuente: Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción. [13]

Otros parámetros de durabilidad, como son la reacción álcali-sílice, la resistencia a sulfatos y la resistencia a la corrosión, mejoran hasta un 25% al aumentar las proporciones de MC.

Ramlochan y Thomas observaron que los morteros elaborados con cualquier porcentaje entre un 5 y un 25% de MC de alta reactividad como sustitución parcial de cementos con un elevado contenido en C3A (aluminato tricalcico) ($\approx 10\%$ de C3A) se consideran moderadamente resistentes a los sulfatos, mientras que los elaborados con MC de alta reactividad y un cemento con un contenido moderado o bajo de C3A ($< 6\%$ de C3A) pueden considerarse altamente resistentes a los sulfatos. ^[2]

Así mismo, la adición de hasta un 15% de metacaolín mejoró la resistencia a la corrosión de la armadura de acero. El rápido consumo del hidróxido cálcico (Ca(OH)_2) y el aumento del C-S-H y de la gehlenita hidratada (C_2ASH_8) generados dan lugar al refinamiento de la estructura porosa, que se ha identificado como el principal mecanismo causante de la mejora de las propiedades del hormigón observadas al añadir MC.

Durante la calcinación, la caolinita pierde la lámina de OH, y transforma a metacaolinita, la red de Si-O permanece intacta y la red de Al-O se colapsa; el Mc resultante tiene una estructura altamente desordenada y su alto contenido de energía interna lo hace potencialmente reactivo como aditivo para el CP. El MC es considerado una puzolana, reacciona con Ca(OH)_2 (CH, portlandita) para formar compuestos que poseen propiedades ligantes (Frias y Cabrera, 2001; Massaza, 2004).

Se ha reportado que el uso de MC favorece el control de reacción expansiva sílice-álcali (Ramlochan et al., 2000), una importante patología de concreto a nivel mundial.

En general se considera que el sacrificio de resistencia mecánica a edades tempranas es bien compensado por una reducción de costo por el uso de menor cantidad de CPO (cemento portland ordinario), y por la obtención de mejores propiedades mecánicas a largo plazo. ^[2]

Sin embargo, los resultados muestran que estos son viables para producir morteros de bajo impacto ambiental con propiedades similares a los de CP (Cemento portland) puro. El MC blanco no solo reemplaza al cemento, su actividad cementosa incrementa o mejoran las propiedades físicas de los morteros.

El desarrollo de la resistencia del MC rojo es más lento que el MC blanco. La calcinación a 750°C registra más alta resistencia a la compresión a 90 días, similar al MC blanco.

Tabla 2. Composición química de algunos materiales puzolánicos.

MATERIAL	INTERVALO SiO ₂ %	INTERVALO Al ₂ O ₃ %	INTERVALO Fe ₂ O ₃ %	INTERVALO 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

Fuente: Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland ^[14]

Cemento y agua

En cuanto a la preparación de este tipo de hormigón no se define la utilización de un tipo de cemento específico. Como se han realizado en otros diseños depende de: tiempo de fraguado, resistencia a sulfatos, la resistencia a la corrosión, trabajabilidad y otros.

Respecto al agua de amasado no se imponen condiciones diferentes a la del hormigón tradicional, pero se debe realizar un incremento del volumen de pasta, respetando la relación agua – cemento, mediante el incremento de volumen de conglomerante, ya sea aumentando la cantidad de cemento o con el uso de aditivos.

Áridos

El material utilizado debe ser resistente, no poroso, pues es necesario limitar su capacidad de absorción, para ello se realizaran los ensayos respectivos tanto del agregado grueso como del agregado fino.^[6]

Agregados

Son partículas que se las encuentran en la naturaleza en diferentes tamaños y formas o como producto de la trituración de las rocas.

En hormigones estructurales, estos agregados pueden llegar a ocupar del 60% al 75% del volumen del concreto, e intervienen con las características del hormigón en estado fresco y endurecido ya que de las propiedades físicas y mecánicas depende la proporción de los componentes de la mezcla.

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 75µm), conocido como “Arena”.

Agregado grueso.- Son las partículas retenidas por el tamiz #4 (tamaño 4.75mm), conocido como “Ripio”.

Fragmentos de roca.- Agregados con tamaño mayor a 3” (tamaño 75mm), se lo utiliza en la preparación del hormigón ciclópeo.

Agregado ligero.- Tienen una baja densidad y resistencia limitada a la compresión, utilizados en la fabricación de los llamados hormigones ligeros.

AGREGADO FINO

Granulometría

Es la clasificación de tamaños de las partículas de un agregado, este proceso se lo realiza mediante la utilización de tamices de diferentes medidas en sus aberturas, esta debe cumplir con los límites de la norma (ASTM C-33).^[15]

Tabla 3. Tamaño de tamices

TAMAÑO DE LA MALLA	% QUE PASA EN PESO
9,52 mm (3/8")	100
4,75 mm (No.4)	95 a 100
2,36 mm (No.8)	80 a 100
1,18 mm (No.16)	50 a 85
0,60 mm (No.30)	25 a 60
0,30 mm (No.50)	10 a 30
0,15 mm (No.100)	2 a 10

Fuente: ASTM C-33. Especificación para agregados en el concreto ^[15]

Módulo de Finura

El módulo de finura o también llamado módulo granulométrico, nos da una idea del grosor o finura del agregado. ^[16]

$$\frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados (tamices estándar)}}{100} \quad \text{Ecuación 3}$$

Los tamices utilizados para determinar el módulo de finura son: No.100, No.50, No.30, No.16, No.8, No.4, 3/8", 3/4", 1½", 3", y 6".

Densidad Relativa

Llamada también gravedad específica, es la relación entre su masa y la masa de agua con igual volumen absoluto. Por lo general los agregados de origen natural tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9. ^[17]

Contenido de Humedad

Al estar expuestos al medio ambiente los agregados pueden llegar a tener cierta humedad.

Las partículas del árido pueden pasar por cuatro estados, que son:

- i. Seco al horno (OD):** se logra con el secado al horno a 110°C hasta que el peso del material sea constante (tiempo 12 horas).
- ii. Seco al aire (AD):** se logra cuando las partículas son expuestas al aire libre.

- iii. **Saturado superficie seca (S.S.S):** estado límite donde las partículas presentan sus poros completamente llenos de agua pero aparentemente se encuentran secas (proceso en laboratorio).
- iv. **Saturado superficie húmeda (S.S.H):** los agregados están llenos de agua y también hay presencia de agua libre en su superficie.

Peso Volumétrico

Se lo realizó como especifica la norma NTE INEN 858^[18], para determinar así el peso volumétrico del agregado en condición compactada o suelta y poder calcular los vacíos entre áridos.

AGREGADO GRUESO

Granulometría

Se recomienda que el agregado total utilizado tenga continuidad de tamaños de sus partículas.

Para la determinación de la granulometría del agregado grueso según la norma ASTM E-11-09^[19] los tamices utilizados son: 2'', ½'', 1'', ¾'', ½'', 3/8'' y #4.

Tamaño Nominal Máximo (TNM)

Para determinarlo se busca el primer valor que represente el 15% o más en la columna de % Retenido Acumulado de la tabla del análisis granulométrico de una muestra de agregado. El TNM será la abertura del tamiz anterior al cual corresponde el 15% o más del % retenido acumulado.^[20]

Densidad Real

El ensayo se realiza según la norma NTE INEN 857^[21], que permite determinar la densidad promedio de una muestra.

Resistencia al Desgaste

La obtención de este parámetro es indispensable pues influye en la durabilidad y resistencia del concreto.

El ensayo se basa según las especificaciones de la norma ASTM - C131. [22] Dicho ensayo se lo conoce como el de la Máquina de los Ángeles, y los resultados se miden por la diferencia entre la masa inicial de la muestra seca y la masa del material utilizado, expresado como porcentaje inicial.

Hormigón

Es un producto no homogéneo, resultado de mezclar arena, grava, cemento y agua. El aglomerante es el cemento hidráulico, la arena y la grava son consideradas como material de relleno y el agua es el catalizador que reacciona con el cemento y hace que este desarrolle sus características ligantes.

El hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a sollicitaciones de tracción. [23]

Calidad del hormigón

Se refiere a tener un control de calidad de los componentes del hormigón: agregados grueso y fino, agua, cemento y aditivos, es decir, que los agregados sean los apropiados.

Se determinan las proporciones que intervienen en la mezcla, aquí es mejor la medición de los componentes del hormigón en peso debido a que las variaciones son menores.

Se debe asegurar que el hormigón esté correctamente mezclado, es decir, que el hormigón presente características buenas en estado fresco.

El hormigón en estado fresco debe ser colocado y compactado en los moldes en donde se verifica que no presente ondulaciones y tenga una buena textura para seguir con el proceso de curado en el cual se le da al hormigón las condiciones de humedad y así elevar su resistencia. [20]

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

➤ Hormigón fresco

Este hormigón que tiene la capacidad de moldearse (plasticidad).

Sus propiedades relevantes son: Consistencia, Docilidad, Homogeneidad y Peso Específico.

- a. **Consistencia:** oposición del hormigón en estado fresco a deformarse.
- b. **Docilidad:** Es la trabajabilidad; es decir, la facilidad de manipular, transportar, colocar y compactar el hormigón en estado fresco.
- c. **Homogeneidad:** corresponde al buen mezclado que debe tener el hormigón en la etapa de diseño.
- d. **Peso específico:** relación existente entre la masa del hormigón fresco y el volumen que ocupa.

➤ **Hormigón endurecido**

Con presencia de humedad el concreto atraviesa un proceso de endurecimiento, es decir que se convierte de un material plástico a uno sólido, debido a que pasa por una fase físico-química compleja.

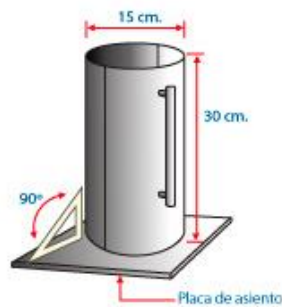
Propiedades relevantes del hormigón endurecido:

- a. **Permeabilidad:** el hormigón es un material permeable, es decir, está expuesto a presión de agua, por lo que a través de su superficie se genera escurrimiento. El parámetro más influyente es la relación agua/cemento, ya que si disminuye esta disminuye su permeabilidad.
- b. **Resistencia a la compresión:** la resistencia a compresión del hormigón es la más estudiada y también es la más elevada en comparación con la resistencia a la tensión que es diez veces menos que la de compresión.

Esta resistencia se mide fracturando probetas cilíndricas en una máquina de ensayos de compresión. La resistencia a la compresión se determina a partir de la carga de ruptura dividida para el área de la sección que resiste a la carga. Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 17 MPa (concreto residencial) hasta 28 MPa y más para estructuras comerciales, y para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta 70 MPa.

La prueba de resistencia del concreto se realiza con probetas cilíndricas para pruebas y para su aceptación deben tener un tamaño de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm) ó 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm), cuando así se especifique. El diámetro del cilindro debe ser como mínimo 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se utilice en el concreto.

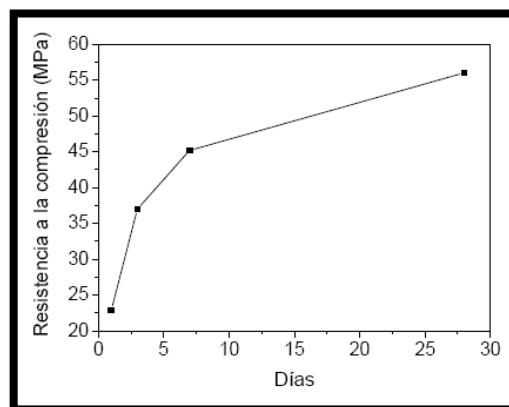
Ilustración 4. Molde Cilíndrico



Fuente: Aceros Arequipa-Procedimientos para elaborar probetas de concreto. [24]

Los laboratoristas que participan en el ensayo de los cilindros de concreto que deben estar certificados. ASTM C 1077-10 [25]

Ilustración 5. Comportamiento de los cilindros a la compresión a diferentes días de curado



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Características de la Deformación

Las propiedades mecánicas del hormigón se determinan aplicando cargas horizontales o verticales a las muestras cilíndricas, generando esfuerzos y por ende deformaciones.

$$E = \frac{P * L}{A * \delta} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 5}$$

Relación lineal entre el esfuerzo unitario y la deformación específica de un elemento sometido a tracción o compresión. [6]

Dónde:

E = Constante de proporcionalidad conocida como el Módulo de Elasticidad del Material.

σ = Esfuerzo unitario

ε = Deformación específica

➤ **Clasificación de las Deformaciones**

- **Deformaciones elásticas**

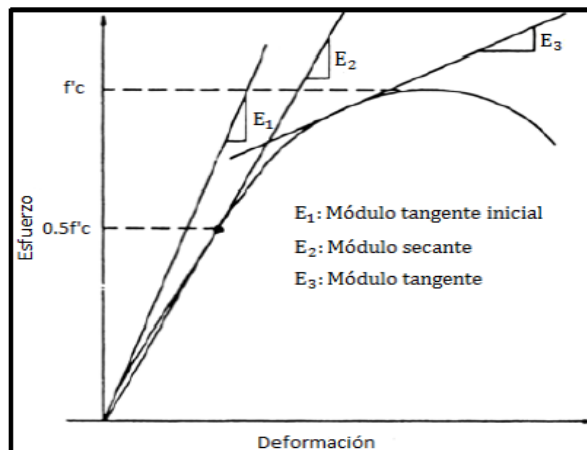
Aquella en la que el cuerpo logra recuperar su forma original al quitar la fuerza que provoca su deformación. [26]

El diagrama característico esfuerzo - deformación del hormigón depende de diversos factores:

- resistencia del hormigón
- edad de aplicación de la carga
- propiedades de sus componentes
- definición del Módulo de Elasticidad [27] (puede ser: módulo tangente, módulo secante o módulo inicial).
 - módulo tangente: llamado Módulo de Elasticidad, su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la tangente a la curva en dicho punto.
 - módulo secante: llamado módulo de deformación, su valor es variable en cada punto y viene medido por la inclinación de la recta que une el origen con dicho punto

- módulo inicial: llamado Módulo de Elasticidad en el origen, que corresponde a la tensión nula, es donde coinciden el módulo tangente y el secante” . [6]

Ilustración 6. Módulos con respecto a la gráfica esfuerzo-deformación hormigón.



Fuente: Diseño de Estructuras de Concreto Armado 4^{ta} edición. [28]

- Deformaciones laterales

Al aplicar una carga de compresión al hormigón, la sección del cilindro se expande en la dirección transversal a la del esfuerzo aplicado. Al estudiar las deformaciones laterales se debe analizar también la relación con el Módulo de Poisson (relación entre la deformación específica transversal y longitudinal), (oscila entre 0.15 y 0.20). [6]

A partir del Módulo de Poisson se define el Módulo de deformación transversal del hormigón (G_c), así:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\mu)} \quad \text{Ecuación 6}$$

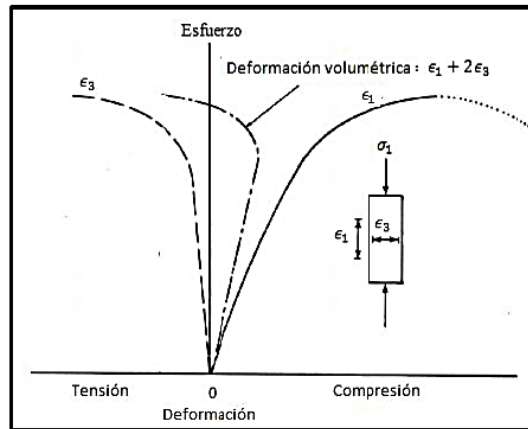
Ecuación. Módulo de deformación transversal

Dónde:

E_c = Modulo de deformación longitudinal.

μ = Valor del Módulo de Poisson

Ilustración 7. Deformaciones longitudinales, transversales y volumétricas de una probeta sometida a carga axial.



Fuente: Diseño de Estructuras de Concreto Armado 4^{ta} edición. [28]

- Deformaciones plástica

Cuando se somete el cilindro a la acción de una carga, se produce deformación elástica manteniéndose mientras la carga actúa y una deformación plástica (creep), que se incrementa con el tiempo. Y cuando se retira la carga, la probeta de hormigón presenta una recuperación elástica de la deformación, pero no alcanza en su totalidad la deformación elástica inicial, manteniendo así esta deformación permanente. [6]

Factores que afectan la deformación plástica:

- i. Nivel de esfuerzo a que se somete el hormigón (la deformación es proporcional al esfuerzo).
- ii. Tiempo de permanencia de la carga, (si la carga se mantiene más tiempo, la deformación plástica será mayor).
- iii. Resistencia y la edad de aplicación de la carga.
- iv. Las condiciones ambientales (a mayor humedad, menor deformación plástica).
- v. Velocidad de aplicación de la carga (más rápido se aplica, más se deforma).
- vi. Relación agua/cemento (mayor cantidad de agua, mayor deformación plástica).
- vii. Tipo y granulometría de los agregados.

Para el cálculo de las deformaciones adicionales ocasionadas por el creep, se utiliza el Coeficiente de Flujo Plástico (C_u).^[6]

$$C_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{ci}}$$

Ecuación 7. Coeficiente de Flujo Plástico.

Dónde:

ε_{cu} = Deformación unitaria producida por el creep en el tiempo.

ε_{ci} = Deformación elástica inicial (Esfuerzo aplicado ÷ Módulo de Elasticidad).

- Deformaciones por contracción

Se produce por pérdida de humedad, es decir por la evaporación del exceso de agua de mezclado, durante el proceso de endurecimiento y secado, siendo esta una de las causas por las que varía el volumen de hormigón.

Para disminuir la contracción del hormigón es necesario:

- ✓ Añadir el agua necesaria, para lograr una buena trabajabilidad del hormigón.
- ✓ Agregados de buena calidad.
- ✓ El curado del hormigón adecuado, lo que ayuda a evitar la contracción hasta que el hormigón logre tener una resistencia mínima que le ayuda a soportar los esfuerzos inducidos por esta.

Esta deformación se produce generalmente en vigas (aumento de deflexiones), pero se la controla colocando acero. La contracción puede verse afectada por algunos factores. Por un lado si las condiciones son muy húmedas esta puede llegar a 0 y en condiciones muy secas puede superar una deformación del orden 0.001.^[6]

2.2. Hipótesis

El hormigón añadido metacaolín, aumenta la resistencia a compresión.

2.3. Señalamiento de variables

2.3.1. Variable independiente

El hormigón añadido metacaolín.

2.3.2. Variable dependiente

Resistencia a la compresión.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Nivel o tipo de investigación

Esta investigación es de tipo experimental, ya que en su desarrollo se entenderá el comportamiento que tiene el hormigón al sustituir parcialmente el cemento por metacaolín lo que dará una idea acertada sobre las propiedades que se pueden modificar al realizar este ensayo de los cilindros variando los porcentajes con respecto al peso del cemento.

Se enmarca en un contexto de investigación de laboratorio porque se desarrollará en un laboratorio para realizar los ensayos de los agregados que se va a utilizar, así como éste es el medio a emplear en la elaboración de las muestras de hormigón.

También es investigación aplicada porque se ha visto que hoy en día se generan gran cantidad de obras las cuales emplean en su proceso constructivo el cemento, y es allí donde se busca darle una solución con el uso de un aditivo puzolanico (metacaolín) el cual hace que el hormigón estructural alcance mayores resistencias.

3.2. Población y muestra

La población y la muestra es la misma, dado que este proyecto es de tipo experimental, y se tomará la población que se encuentra especificada en la norma ASTM C31, ^[29] la misma que menciona que se debe preparar al menos 2 probetas de hormigón para la realización de los diferentes ensayos de compresión y tensión.

Pero para reducir la incertidumbre que se pueda dar se elaborarán 3 probetas de hormigón que serán ensayadas en los días especificados para lograr las resistencias esperadas.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1 Variable Independiente

Hormigón añadido metacaolín

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnica e instrumentos
Material silico-aluminoso activado que se obtiene mediante la calcinación a 650-800 °C de una arcilla llamada caolín, que añadido al HORMIGÓN ayudan a mejorar sus PROPIEDADES y también garantiza una buena trabajabilidad.	Hormigón	Tipos de Hormigón	¿Qué tipo de hormigón se puede elaborar en nuestro medio?	Investigación de Laboratorio y Experimental
		Calidad del Hormigón	¿Cuáles son las normas que un hormigón debe cumplir para que sea de buena calidad	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM.
	Propiedades	Propiedades Mecánicas	¿Cuáles son las propiedades que se mejoran?	Investigación Bibliográfica Normas ASTM.
		Porcentaje de metacaolín	¿Cuál es el rango de variación de porcentaje de metacaolín utilizados en los cilindros?	Investigación de Laboratorio y Experimental

Tabla 4. Operacionalización de la variable independiente

3.3.2 Variable Dependiente

Resistencia a la compresión

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnica e instrumentos
<p>La resistencia se define como la capacidad de un elemento de soportar esfuerzos y fuerzas sin romperse.</p> <p>El hormigón resiste los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (flexión, cortante, tracción etc.), razón por la que se lo asocia con acero para lograr el comportamiento adecuado ante los otros tipos de esfuerzos.</p>	Hormigón Fresco	Docilidad	¿Qué factores influyen en la trabajabilidad del hormigón?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM
		Consistencia	¿Qué método es el más apropiado para determinar el asentamiento del hormigón?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM
	Hormigón Endurecido	Resistencia a la compresión	¿Cómo afectan las cantidades de los componentes en la resistencia a compresión de los cilindros?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM Investigación de Laboratorios
		Permeabilidad	¿De qué parámetro depende la permeabilidad del hormigón?	Investigación Bibliográfica y Laboratorio

Tabla 5. Operacionalización de la variable dependiente

3.4. Plan de recolección de información

PREGUNTAS	EXPLICACIÓN
1. ¿Qué evaluar?	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar el comportamiento de las probetas cilíndricas de hormigón añadidas metacaolín, empleado para mejorar la resistencia del hormigón. - Definir las dosificaciones de las probetas con diferentes porcentajes de metacaolín. - Analizar el comportamiento de las muestras a través del ensayo de resistencia a la compresión. - Comparar la resistencia a la compresión del hormigón común con el hormigón añadido metacaolín.
2. ¿De qué objetos?	<ul style="list-style-type: none"> - Agregado fino. - Agregado grueso. - Probetas cilíndricas de hormigón común y de hormigón añadido metacaolín.
3. ¿Sobre qué aspectos?	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamiento de hormigón añadido metacaolín. - Influencia en la resistencia a la compresión.
4. ¿Quién?	<ul style="list-style-type: none"> - Egdo. Roberto Carlos Rodríguez Guevara.
5. ¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> - Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.
6. ¿Cómo y con qué?	<ul style="list-style-type: none"> - Mediante ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión. - Investigación bibliográfica en Normas, Códigos, Ensayos Técnicos, Tesis.

Tabla 6. Recolección de la información

3.5. Plan procesamiento y análisis

En el procesamiento y análisis de la información recolectada se efectuará el siguiente plan:

- ✓ Revisión crítica de la información obtenida; es decir, depuración de la información defectuosa.
- ✓ Tabulación y cuadros según las variables de la hipótesis: manejo de información.
- ✓ Representación de los resultados mediante gráficos estadísticos.
- ✓ Análisis e interpretar los resultados relacionándolos con las diferentes partes de la investigación, especialmente con los objetivos y la hipótesis.
- ✓ Comprobación de la Hipótesis en base a los resultados obtenidos en la investigación.
- ✓ Formulación de conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Recolección de datos



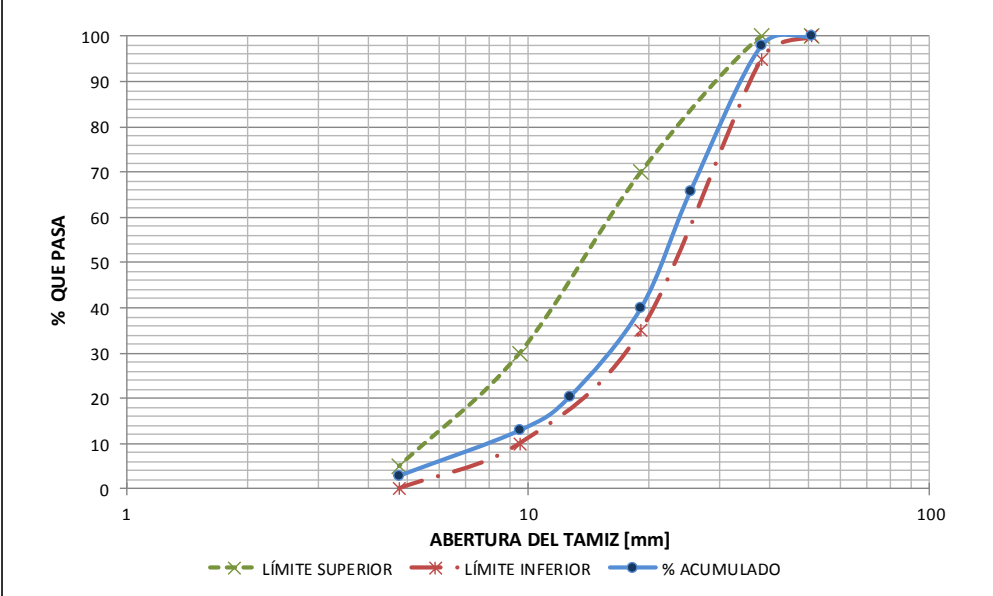
- ✓ Se ejecutarán los ensayos en laboratorio de los agregados fino y grueso así como también del metacaolín para la determinación de sus propiedades mecánicas y verificar si éstas cumplen con los requerimientos establecidos por la Norma NTE INEN 872. ^[29]
- ✓ Se empleará caolín rojo calcinado en la “Ladrillera Tirado” ubicada en Ambato, para su uso en el concreto, material que será adquirido a través de la empresa SISECOL, el mismo que cuenta con características similares a otros tipos de caolín empleados en diferentes ensayos realizados en otros países en la elaboración de este material, el metacaolín.
- ✓ Los hormigones serán elaborados de una resistencia a la compresión esperada de 210 kg/cm^2 y la dosificación se la realizará utilizando el Método de la Universidad Central del Ecuador.
- ✓ El rango de dosificación generalmente en materiales cementantes suplementarios fluctúa entre 5% y 20% en relación al peso del cemento. ^[30]
Para la elaboración de las probetas se empleara así:
 - **PRIMERA:** 10% de metacaolín respecto al peso del cemento.
 - **SEGUNDA:** 20% de metacaolín respecto al peso del cemento.
 - **TERCERA:** 35% de metacaolín respecto al peso del cemento.
- ✓ Se realizará muestras de cilindros de hormigón simple como referencia y se lo comparará con el hormigón añadido metacaolín. Los ensayos a realizarse a las probetas estarán respaldados por la ASTM C31. ^[31]

4.1.1. Ensayos realizados al agregado grueso y fino.

Los agregados a utilizarse en los ensayos provienen del Río Pastaza los cuales son procesados en la Planta de Trituración “Zúñiga”.

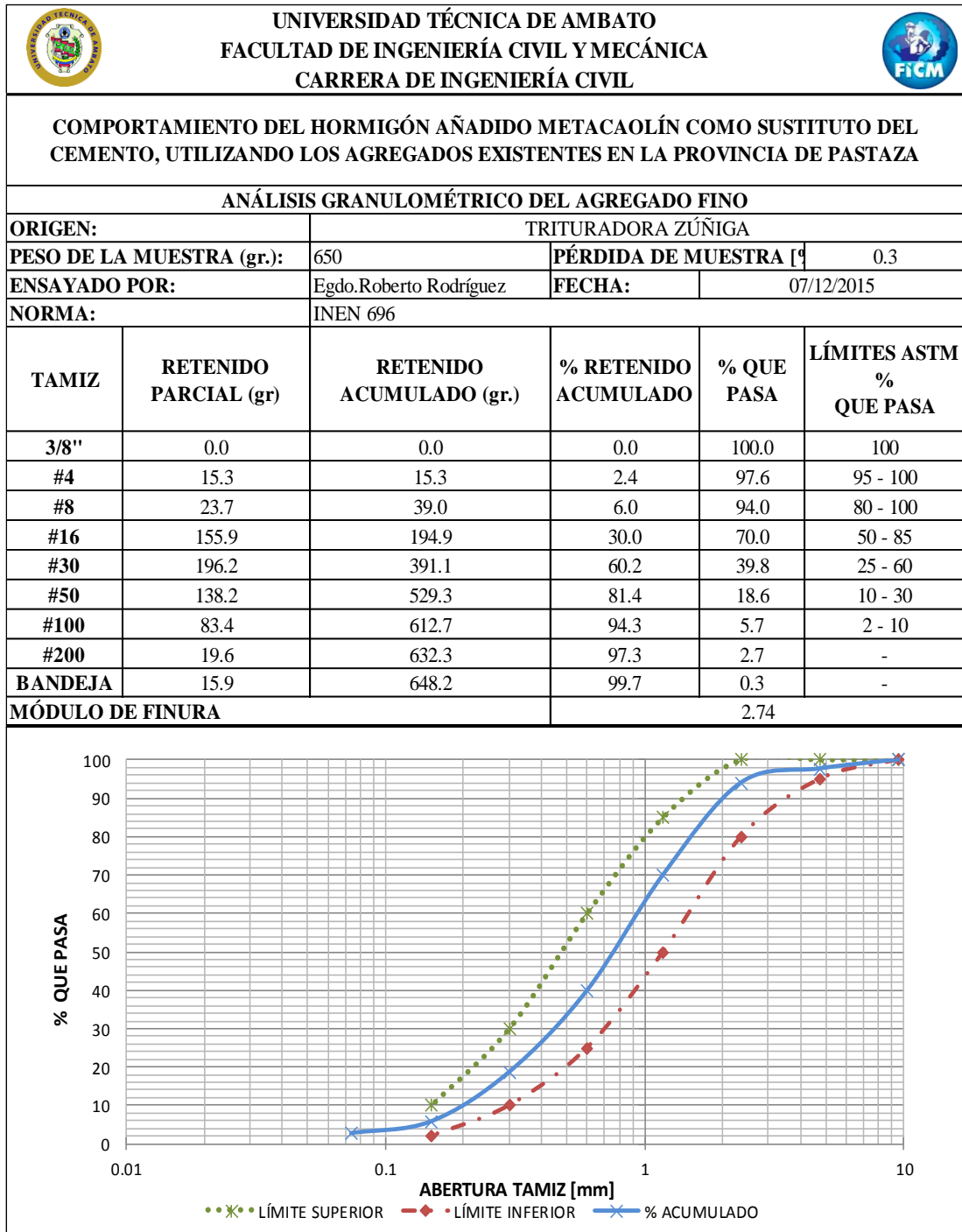
➤ Análisis Granulométrico

Tabla 7. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso. (Trituradora Zúñiga)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
 					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - AGREGADO GRUESO					
ORIGEN:		TRITURADORA ZÚÑIGA			
PESO DE LA MUESTRA [gr]:		9500	PÉRDIDA DE MUESTRA [%]	0.3	
ENSAYADO POR:		Egdo.Roberto Rodríguez	FECHA:	07/12/2015	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	RETENIDO PARCIAL [gr]	RETENIDO ACUMULADO [gr]	RETENIDO ACUMULADO [%]	% QUE PASA [%]	LÍMITES ASTM % QUE PASA
2"	0.0	0.0	0.0	100.0	100
1 1/2"	204.4	204.4	2.2	97.8	95 - 100
1"	3040.2	3244.6	34.2	65.8	-
3/4"	2455.4	5700.0	60.0	40.0	35 - 70
1/2"	1854.9	7554.9	79.5	20.5	-
3/8"	706.2	8261.1	87.0	13.0	10 - 30
#4	954.2	9215.3	97.0	3.0	0 - 5
BANDEJA	255.8	9471.1	99.7	0.3	-
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO:			1"		
					

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez



Tabla 8. Análisis Granulométrico del Agregado Fino. (Trituradora Zúñiga)



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

➤ Densidad real

Tabla 9. Densidad real suelta del agregado grueso y fino. (Trituradora Zúñiga)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
ORIGEN:	TRITURADORA ZÚÑIGA			
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	09/12/2015	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE [kg]:	9.8			
VOLUMEN DEL RECIPIENTE [dm³]:	0.02056			
AGREGADO	AGREGADO + RECIPIENTE [kg]	AGREGADO [kg]	PESO UNITARIO [kg/dm ³]	PESO UNITARIO PROMEDIO [kg/dm ³]
GRUESO	42.1	32.3	1.5710	1.5686
	42	32.2	1.5661	
FINO	41.9	32.1	1.5613	1.5564
	41.7	31.9	1.5516	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 10. Densidad real compactada agregado grueso y fino. (Trituradora Zúñiga)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
PESO UNITARIO COMPACTADO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	TRITURADORA ZÚÑIGA			
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	09/12/2015	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE [kg]:	9.8			
VOLUMEN DEL RECIPIENTE [dm³]:	0.02056			
AGREGADO	AGREGADO + RECIPIENTE [kg]	AGREGADO [kg]	PESO UNITARIO [kg/dm ³]	PESO UNITARIO PROMEDIO [kg/dm ³]
GRUESO	45.5	35.7	1.7364	1.7388
	45.6	35.8	1.7412	
FINO	44.6	34.8	1.6926	1.6999
	44.9	35.1	1.7072	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 11. Densidad real compactada de la muestra. (Trituradora Zúñiga)


UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA								
PESO UNITARIO COMPACTADO DE LA MEZCLA								
ORIGEN:	TRITURADORA ZÚÑIGA							
ENSAYADO POR:	Egdo.Roberto Rodríguez	FECHA:	09/12/2015					
NORMA:	INEN 858							
MASA RECIPIENTE [Kg]	9.8							
VOLUMEN RECIPIENTE [dm]	0.02056							
% MEZCLA		CANTIDAD [Kg]		FINO AÑADIDO [Kg]	AGREGADO + RECIPIENTE [Kg]	AGREGADO [Kg]	PESO UNITARIO MEZCLA [Kg/dm ³]	PESO UNITARIO PROMEDIO [Kg/dm ³]
R	A	R	A	A	AGREGADO FINO + AGREGADO GRUESO			
100	0	40	0.00	0.00	45.5	35.7	1.736	1.739
					45.6	35.8	1.741	
90	10	40	4.44	4.44	47.4	37.6	1.829	1.836
					47.7	37.9	1.843	
80	20	40	10.00	5.56	49.2	39.4	1.916	1.911
					49.0	39.2	1.907	
70	30	40	17.14	7.14	50.4	40.6	1.975	1.977
					50.5	40.7	1.980	
60	40	40	26.67	9.52	51.0	41.2	2.004	2.001
					50.9	41.1	1.999	
50	50	40	40.00	13.33	50.7	40.9	1.989	1.994
					50.9	41.1	1.999	
40	60	40	60.00	20.00	50.0	40.2	1.955	1.950
					49.8	40	1.946	

PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO FINO	42	[%]
PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	58	[%]
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO FINO	38	[%]
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO GRUESO	62	[%]
PESO UNITARIO MÁXIMO	2.000	[gr/cm ³]
PESO UNITARIO ÓPTIMO	1.990	[gr/cm ³]

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez



➤ Densidad Real

Tabla 12. Densidad real del ripio. (Trituradora Zúñiga)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA			
ORIGEN:	PLANTA DE TRITURACIÓN ZÚÑIGA		
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	14/12/2015
NORMA:	INEN 857		
DATO	CORRESPONDENCIA	UNIDAD	VALOR
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DEL RIPIO			
M1	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AIRE	[gr]	1231
M2	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AGUA	[gr]	1065
M3	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	[gr]	4623
M4	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	[gr]	3190
DA	DENSIDAD REAL DEL AGUA	[gr/cm ³]	1,000
M5 = M3 - M1	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	[gr]	3392
M6 = M4 - M2	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	[gr]	2125
VR = (M5-M6) / DA	VOLUMEN REAL DE LA MUESTRA	[cm ³]	1267
DR = M5 / VR	DENSIDAD REAL DEL RIPIO	[gr/cm ³]	2,677

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 13. Densidad real de la arena. (Trituradora Zúñiga)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA			
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	18/12/2015
NORMA:	INEN 857		
DATO	CORRESPONDENCIA	UNIDAD	VALOR
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DE LA ARENA			
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	[gr]	183,6
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S.	[gr]	527,8
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S. + AGUA	[gr]	898,3
M4 = M3 - M2	MASA AGUA AÑADIDA	[gr]	370,5
M5	MASA PICNÓMETRO + 500 cm ³ DE AGUA	[gr]	683,6
M6 = M5 - M1	MASA DE 500 cm ³ DE AGUA	[gr]	500,0
DA = M6 / 500 cm³	DENSIDAD DEL AGUA	[gr/cm ³]	1,000
M7 = M6 - M4	MASA DE AGUA DESALOJADA POR LA MUESTRA	[gr]	129,5
Msss = M2 - M1	MASA DEL AGREGADO	[gr]	344,2
Vsss = M7 / DA	VOLUMEN DE AGUA DESALOJADA	[cm ³]	129,5
DRA = Msss / Vsss	DENSIDAD REAL DE LA ARENA	[gr/cm ³]	2,7

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

4.1.2. Ensayos realizados al cemento y metacaolín

Tabla 14. Densidad real del cemento.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO				
TIPO:	Cemento Holcim Rocafuerte			
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez		FECHA:	17/12/2015
DATOS	CORRESPONDENCIA	UNIDAD	M1	M2
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	gr	163,2	152,6
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + CEMENTO	gr	343,2	332,6
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + CEMENTO + GASOLINA	gr	663,3	655,8
M4 = M3 - M2	MASA GASOLINA AÑADIDA	gr	320,1	323,2
M5	MASA DEL PICNÓMETRO + 500 cm ³ GASOLINA	gr	529,0	520,2
M6 = M5 - M1	MASA 500 cm ³ GASOLINA	gr	365,8	367,6
DG = M6 / 500	DENSIDAD DE LA GASOLINA	gr./cm ³	0,732	0,735
M7 = M6 - M4	MASA GASOLINA DESALOJADA POR EL CEMENTO	gr	45,7	44,4
MC = M2 - M1	MASA DE CEMENTO	gr	180	180
VG = M7 / DG	VOLUMEN DE GASOLINA DESALOJADA	cm ³	62,47	60,39
DRC = MC/VG	DENSIDAD REAL DEL CEMENTO	gr./cm ³	2,882	2,981
P = (DRC1 + DRC2) / 2	DENSIDAD REAL PROMEDIO DEL CEMENTO	gr./cm ³	2,931	

La densidad del cemento varía entre 2.9 y 3.15 Ton/m³.

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez



Tabla 15. Densidad real del metacaolín.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez		FECHA:	18/12/2015
NORMA:	INEN 857			
DATO	CORRESPONDENCIA	UNIDAD	VALOR	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DEL METACAOLÍN				
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	[gr]	174,1	
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + METACAOLÍN	[gr]	274,0	
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + METACAOLÍN + AGUA	[gr]	731,4	
M4 = M3 - M2	MASA AGUA AÑADIDA	[gr]	457,4	
M5	MASA PICNÓMETRO + 500 cm ³ DE AGUA	[gr]	674,1	
M6 = M5 - M1	MASA DE 500 cm ³ DE AGUA	[gr]	500,0	
DA = M6 / 500 cm³	DENSIDAD DEL AGUA	[gr/cm ³]	1,000	
M7 = M6 - M4	MASA DE AGUA DESALOJADA POR LA MUESTRA	[gr]	42,6	
Msss = M2 - M1	MASA DEL AGREGADO	[gr]	99,9	
Vsss = M7 / DA	VOLUMEN DE AGUA DESALOJADA	[cm ³]	42,6	
DRA = Msss / Vsss	DENSIDAD REAL DEL METACAOLÍN	[gr/cm ³]	2,4	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez



➤ Capacidad de Absorción

Tabla 16. Capacidad de absorción del ripio. (Trituradora Zúñiga)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
ORIGEN:	PLANTA DE TRITURACIÓN ZÚÑIGA			
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	14/12/2015	
NORMA:	INEN 857			
DATO	CORRESPONDENCIA	UNIDAD	VALOR	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL RIPIO				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	[gr]	25,5	24,5
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	[gr]	145,1	158,2
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	[gr]	119,6	133,7
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	[gr]	144	157,4
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	[gr]	118,5	132,9
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	[%]	0,93	0,60
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL RIPIO	[%]	0,77	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 17. Capacidad de absorción de la arena. (Trituradora Zúñiga)

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN COMÚN CON EL HORMIGÓN ADICIONADO FIBRAS DE NYLON, UTILIZANDO AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
ORIGEN:	PLANTA DE TRITURACIÓN ZÚÑIGA			
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	14/12/2015	
DATO	CORRESPONDENCIA	UNIDAD	VALOR	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE LA ARENA				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	[gr]	25,5	24,5
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	[gr]	145,1	158,2
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	[gr]	119,6	133,7
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	[gr]	143,7	156,8
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	[gr]	118,2	132,3
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	[%]	1,18	1,06
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL ARENA	[%]	1,12	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 18. Capacidad de absorción del metacaolín.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA			
TIPO:	Metacaolín		
ENSAYADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	FECHA:	17/12/2015
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL METACAOLÍN			
M7	MASA DEL RECIPIENTE	[gr]	25,2
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	[gr]	147
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	[gr]	121,8
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	[gr]	136,7
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	[gr]	111,5
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	[%]	9,238

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

4.1.3. Dosificación del Hormigón

Para este trabajo investigativo se utilizará el Método de la Densidad Máxima proporcionado por la Universidad Central del Ecuador, ^[32] y cual establece que para el diseño de los hormigones serán necesarios los siguientes datos:

- Densidad real de la Arena (DRA)
- Densidad real del Ripio (DRR)
- Porcentaje Óptimo de Arena (POA)
- Porcentaje Óptimo de Ripio (POR)
- Densidad Óptima de la Mezcla de Agregados (DOMAg)
- Asentamiento Requerido
- Densidad Real del Cemento (DRC)
- Resistencia a Compresión ($f'c$)

Procedimiento y fórmulas empleadas para el cálculo de los requerimientos mencionados.

Densidad Real del Agregado (DRAg)

$$DRAg = \frac{(DRA * POA) + (DRR * POR)}{100} \quad \text{Ecuación 8}$$

Porcentaje Óptimo de Vacíos (%OV)

$$\%OV = \left(\frac{DRAg - DOMAg}{DRAg} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Cantidad de Pasta (CP)

Tabla 19. Cantidad de pasta para diferentes asentamientos

ASENTAMIENTO	CANTIDAD DE PASTA (%)
0 – 3	%OV + 2% + 3%(%OV)
3 – 6	%OV + 2% + 6%(%OV)
6 – 9	%OV + 2% + 8%(%OV)
9 – 12	%OV + 2% + 11%(%OV)
12 - 15	%OV + 2% + 13%(%OV)

Fuente: Investigación sobre el Módulo de Elasticidad del Hormigón. ^[33]

Tabla 20. Relación Agua / Cemento (W/C)

RESISTENCIA A LOS 28 DÍAS [Kg/cm ²]	RELACIÓN W/C
450	0,37
420	0,40

CONTINUA



400	0,42
350	0,47
320	0,51
300	0,52
280	0,53
250	0,56
240	0,57
210	0,58
180	0,62
150	0,70



Fuente: Investigación sobre el Módulo de Elasticidad del Hormigón. ^[33]

CONSISTENCIA EN CONO		NORMATIVA EUROPEA	
Consistencia	Asentamiento en cm.	Clase	Asentamiento en mm.
Seca	0 a 2	S1	10 a 40
Plástica	3 a 5	S2	50 a 90
Blanda	6 a 9	S3	100 a 150
Fluida	10 a 15	S4	≥ 160
Líquida	≥ 16		

Consistencia del Hormigón	Aspecto	Asentamiento [cm]	Método de Compactación
A-1 Seca	Suelto y sin cohesión	1,0 a 4,5	Vibración potente, apisonado enérgico en capas delgadas
A-2 Plástica	Levemente cohesivo	5,0 a 9,5	Vibración normal, varillado y apisonado.
A-3 Blando	Levemente fluido	10,0 a 15,0	Vibración leve, varillado.
A-4 Superfluidificado	Fluido	15,5 a 22,0	Muy leve y cuidadosa vibración, varillado

Fuente: <http://ingcivil-notasapuntes.blogspot.com/2015/02/ensayo-de-consistencia-del-concreto.html>

Cantidad de Cemento (C)

$$C = \frac{CP}{\left(\frac{W}{C}\right) + \frac{1}{DRC}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Cantidad de Agua (W)

$$W = \left(\frac{W}{C} \right) * C \quad \text{Ecuación 11}$$

Cantidad de Arena (A)

$$A = (1000 - CP) * \frac{DRA * POA}{100} \quad \text{Ecuación 12}$$

Cantidad de Ripio (R)

$$R = (1000 - CP) * \frac{DRR * POR}{100} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dosificación al peso

Una vez concluido el procedimiento descrito y tomando en cuenta las condiciones de saturada superficie seca (SSS) de los agregados se obtienen otros factores de los materiales para realizar la dosificación.

❖ **Dosificación al peso de los materiales**

La dosificación de los materiales se la realiza para 1 m³ de hormigón.

$$\text{Dosificación (W, R, A)} = \frac{\text{Cantidad de material de mezclado (W, R, A)}}{\text{Cantidad de Cemento (C)}}$$

Ecuación 14

$$\text{Cantidad (W, R, A) por 1 saco} = \frac{\text{Dosificación (W, R, A)} * 50 \text{ kg}}{1}$$

Ecuación 15

Tabla 21. Dosificación por el método de la densidad óptima.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA			
DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN MÉTODO DE LA DENSIDAD ÓPTIMA			
ORIGEN:	TRITURADORA ZÚÑIGA		
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	DATOS DE TABLAS	
FECHA:	21/12/2015	w / c	0.58
DATOS DE ENSAYO		CP en %	%POV +2% + 8% POV
f _c	210 gr/cm ²	CÁLCULOS	
Asentamiento	6 cm	DRAg	2.686 kg/dm ³
DRC	2.931 gr/cm ³	POV	25.905 %
DRA	2.7 gr/cm ³	CP	299.774 dm ³
DRR	2.677 gr/cm ³	C	325.423 kg
POA	38 %	W	188.746 lts
POR	62 %	A	718.432 kg
DOMAg	1.990 gr/cm ³	R	1162.194 kg
DOSIFICACIÓN AL PESO			
MATERIAL	CANTIDAD EN (KG) POR CADA M3 DE HORMIGÓN	DOSIFICACIÓN AL PESO	CANTIDAD EN (kg) POR SACO DE CEMENTO DE 50kg.
W	188.746	0.58	29.00
C	325.423	1.00	50.00
A	718.432	2.21	110.38
R	1162.194	3.57	178.57
TOTAL	2394.795	kg./m³ Densidad del Hormigón	
NOMENCLATURA			
DRC	Densidad Real del Cemento	POV	Porcentaje Óptimo de Vacíos
DRA	Densidad Real de la Arena	CP	Cantidad de Pasta
DRR	Densidad Real del Ripio	C	Cantidad de Cemento
POA	Porcentaje Óptimo Arena	W	Cantidad de Agua
POR	Porcentaje Óptimo Ripio	A	Cantidad de Arena
DOMAg	Densidad Óptima de la mezcla	R	Cantidad de Ripio
w / c	Relación Agua/Cemento	C.A.	Capacidad de Absorción
CP en %	Porcentaje de Cantidad de Pasta	C.H.	Contenido de Humedad 24 h. antes
DRAg	Densidad Real de la mezcla		

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Nota: Todas las cantidades obtenidas se aplican para cuando los agregados se encuentran en condiciones SSS, pero en ocasiones los agregados no cumplen estas condiciones por lo que se debe realizar una corrección adicional, esta es la corrección de la dosificación por humedad.

Corrección a la dosificación

Se hace necesario determinar el contenido de humedad que presentan los agregados tanto fino como grueso y se recomienda que se lo realice un día antes de realizar la mezcla. NTE INEN 856^[17] – 857^[21].

$$\text{Corrección Arena} = \text{Masa (arena)} * \frac{100 + \% \text{humedad (arena)}}{100 + \% \text{absorción (arena)}}$$

Ecuación 16

$$\text{Corrección Ripio} = \text{Masa (ripio)} * \frac{100 + \% \text{humedad (ripio)}}{100 + \% \text{absorción (ripio)}}$$

Ecuación 17

Tabla 22. Corrección de la dosificación

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA								
CORRECCIÓN A LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$								
ORIGEN:	TRITURADORA ZUÑIGA							
REALIZADO POR:	Egdo.Roberto Rodríguez	FECHA:	07/08/2014					
CANTIDAD DE CEMENTO PARA HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ NECESARIO POR DOSIFICACIÓN (6 Cilindros)								
VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS					0.032 m ³			
VOLUMEN DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ NECESARIO POR DOSIFICACIÓN					0.032 m ³			
CANTIDAD DE CEMENTO PARA 1 m ³ DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$					325.42 kg			
CANTIDAD DE CEMENTO PARA HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$					10.35 kg			
CORRECCIÓN A LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$								
MATERIAL	DOSIFICACIÓN AL PESO	PESO	C.A. (%)	C.H. (%)	CORRECCIÓN (%)	CANTIDADES (kg)	DOSIFICACIÓN	
W	0.58	6.00				-3.85	2.15	0.21
C	1.00	10.35				-	10.35	1.00
A	2.21	22.85	1.12	15.36	-14.24	-3.25	26.11	2.52
R	3.57	36.97	0.77	2.38	-1.62	-0.60	37.57	3.63
NOMENCLATURA								
C.A.	Capacidad de Absorción				W	Agua		
C.H.	Contenido de Humedad con muestras de 24 h. antes				A	Arena		
C	Cemento				R	Ripio		

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Dosificación para los Cilindros (DHC)

Es necesario conocer las dimensiones de los cilindros, los cuales para esta investigación son de un tamaño de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm), así como también el número de cilindros a realizarse.

Para ello se emplearán las siguientes fórmulas:

- Volumen de hormigón

$$VCH = \left(\frac{\pi * D^2}{4} * H \right) * \# \text{ Cilindros} \quad \text{Ecuación 18}$$

- Dosificación de Hormigón para cilindros

$$DHC = \text{Dosificación por volumen} * VCH \quad \text{Ecuación 19}$$



4.1.4. Porcentaje de Metacaolín empleado en el Hormigón

Según un artículo publicado por NRMCA denominado **CIP 30 - Adiciones al cemento**,^[30] menciona que se emplea entre el 5% y el 15% en peso de los materiales cementantes, es por ello que para esta investigación el porcentaje de partida será del 10% de metacaolín.

4.2. Análisis de resultados



4.2.1. Determinación de propiedades del hormigón en estado fresco $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 23. Propiedades del Hormigón en estado fresco - Hormigón simple y Hormigón añadido metacaolín

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 												
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA												
PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO EN CILINDROS DE HORMIGÓN CON $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$												
ORIGEN:		PLANTA DE TRITURACIÓN ZUÑIGA						NORMA:				
REALIZADO POR:		Egdo. Roberto Rodríguez						ALTURA DE CILINDRO [m]:				
								NEN 1578 - NTE INEN 1579				
								0,3				
PROBETA N°	% DE METACAOLÍN	FECHA DE ELABORACIÓN	DIÁMETRO [cm]	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN [Kg]	MASA DEL RECIPIENTE VACÍO [Kg]	PESO CILINDRO [Kg]	VOLUMEN DEL RECIPIENTE [m³]	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA [cm]	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD [Kg/m³]	DENSIDAD MEDIA [Kg/m³]
1	0	16/03/2016	15,34	24,4	11,4	13,0	0,006	BUENA	6,0	BUENA	2344,67	2349,35
2			15,27	24,3	11,4	12,9	0,005				2348,01	
3			15,28	24,4	11,1	13,3	0,006				2417,65	
4			15,32	24,2	11,4	12,8	0,006				2314,63	
5			15,32	24,3	11,4	12,9	0,006				2332,71	
6			15,33	24,5	11,4	13,1	0,006				2365,79	
7			15,35	24,3	11,3	13,0	0,006				2341,61	
8			15,34	24,4	11,5	12,9	0,006				2326,63	
9			15,32	24,3	11,3	13,0	0,006				2350,79	
10			15,28	24,5	11,4	13,1	0,006				2381,30	
11			15,33	24,5	11,4	13,1	0,006				2365,79	
12			15,30	24	11,3	12,7	0,006				2302,55	
1	10	16/03/2016	15,26	24,4	11,3	13,1	0,005	BUENA	6,0	BUENA	2387,54	2356,86
2			15,37	24,4	11,5	12,9	0,006				2317,56	
3			15,28	24,5	11,7	12,8	0,006				2326,76	
4			15,11	24,7	11,4	13,3	0,005				2472,36	
5			15,22	24,1	6,8	17,3	0,005				3175,11	
6			15,14	24,4	11,4	13,0	0,005				2407,02	
7			15,22	20,1	11,5	8,6	0,005				1575,64	
8			15,26	24,6	11,3	13,3	0,005				2423,99	
9			15,22	24,2	11,6	12,6	0,005				2308,50	
10			15,12	24,4	11,5	12,9	0,005				2394,83	
11			15,21	24,5	11,6	12,9	0,005				2366,57	
12			15,15	22,9	11,4	11,5	0,005				2126,48	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez



Tabla 24. Propiedades del Hormigón en estado fresco - Hormigón simple y Hormigón añadido metacaolín

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 												
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA												
PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO EN CILINDROS DE HORMIGÓN CON $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$												
ORIGEN:		PLANTA DE TRITURACIÓN ZÚNIGA					NORMA:			NEN 1578 - NTE INEN 1579		
REALIZADO POR:		Egdo. Roberto Rodríguez					ALTURA DE CILINDRO [m]:			0,3		
PROBETA N°	% DE METACAOLÍN	FECHA DE ELABORACIÓN	DIÁMETRO [cm]	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN [Kg]	MASA DEL RECIPIENTE VACÍO [Kg]	PESO CILINDRO [Kg]	VOLUMEN DEL RECIPIENTE [m ³]	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA [cm]	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD [Kg/m ³]	DENSIDAD MEDIA [Kg/m ³]
1	20	16/03/2016	15,14	24,4	11,5	12,9	0,005	BUENA	4,5	BUENA	2388,51	2389,72
2			15,12	24,6	11,6	13,0	0,005				2413,40	
3			15,22	24,2	9,0	15,2	0,005				2784,86	
4			15,33	22,3	11,4	10,9	0,006				1968,48	
5			15,21	24,3	11,4	12,9	0,005				2366,57	
6			15,14	24,4	10,2	14,2	0,005				2629,21	
7			15,10	24,3	11,6	12,7	0,005				2363,95	
8			15,15	22,9	11,5	11,4	0,005				2107,99	
9			15,11	24,7	11,5	13,2	0,005				2453,77	
10			15,11	24,4	11,6	12,8	0,005				2379,41	
11			15,14	24,3	11,5	12,8	0,005				2369,99	
12			15,12	24,6	11,4	13,2	0,005				2450,53	
1	35	17/03/2016	15,26	24,4	11,2	13,2	0,005	MEDIA	3,5	BUENA	2405,77	2307,25
2			15,34	24,5	11,6	12,9	0,006				2326,63	
3			15,28	24,5	11,4	13,1	0,006				2381,30	
4			15,30	24,3	11,5	12,8	0,006				2320,68	
5			15,30	24,3	11,6	12,7	0,006				2302,55	
6			15,33	22,3	11,3	11,0	0,006				1986,54	
7			15,35	24,2	11,5	12,7	0,006				2287,58	
8			15,30	24,0	11,4	12,6	0,006				2284,42	
9			15,28	24,5	11,5	13,0	0,006				2363,12	
10			15,31	24,4	11,3	13,1	0,006				2371,97	
11			15,26	24,4	11,6	12,8	0,005				2332,87	
12			15,35	24,3	11,4	12,9	0,006				2323,60	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez


4.2.2. Comportamiento a compresión de cilindros de hormigón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 25. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 7 días de edad.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 																	
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA																	
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 7 DÍAS DE EDAD																	
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM								NORMA		NTE INEN 1573 - ASTM C 39						
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez								ALTURA DE CILINDRO [m]:		0,3						
PROBETA N°	% DE METACAOLÍN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO [cm]	ÁREA [cm ²]	VOLUMEN [m ³]	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m ³]	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR [%]	VALOR OBTENIDO [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]
										KN	KG						
1	0	16/03/2016	23/03/2016	15,24	182,41	0,005	13,023	2379,74	2392,14	241,90	24666,94	135,22	139,96	7	65	66,65	75
2				15,10	179,08	0,005	12,918	2404,53		248,30	25319,55	141,39					
3				15,22	181,94	0,005	12,880			255,60	26063,95	143,26					
1	10	16/03/2016	23/03/2016	15,20	181,46	0,005	13,002	2388,43	2361,39	304,90	31091,15	171,34	169,65	7	65	80,79	75
2				15,30	183,85	0,006	12,885	2336,09		295,00	30081,63	163,62					
3				15,15	180,27	0,005	12,761	2359,65		307,60	31366,47	174,00					
1	20	16/03/2016	23/03/2016	15,32	184,33	0,006	12,874	2328,01	2339,20	191,50	19527,57	105,94	111,53	7	65	53,11	75
2				15,32	184,33	0,006	12,926	2337,41		202,20	20618,66	111,85					
3				15,25	182,65	0,005	12,889	2352,17		209,20	21332,46	116,79					
1	35	17/03/2016	24/03/2016	15,23	182,18	0,005	12,887	2357,98	2362,52	113,50	11573,78	63,53	69,51	7	65	33,10	75
2				15,23	182,18	0,005	12,797	2341,52		125,10	12756,65	70,02					
3				15,20	181,46	0,005	13,000	2388,06		133,40	13603,01	74,96					

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 26. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 14 días de edad.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 																		
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA																		
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 14 DÍAS DE EDAD																		
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM										NORMA		NTE INEN 1573 - ASTM C 39					
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez										ALTURA DE CILINDRO [m]:							0,3
PROBETA N°	% DE METACAOLÍN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO [cm]	ÁREA [cm ²]	VOLUMEN [m ³]	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m ³]	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR [%]	VALOR OBTENIDO [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]	
										KN	KG							
4	0	16/03/2016	30/03/2016	15,20	181,46	0,005	13,056	2398,35	2391,82	300,80	30673,06	169,04	174,20	14	80	82,95	90	
5				15,10	179,08	0,005	12,892	2399,69		319,10	32539,14	181,70						
6				15,19	181,22	0,005	12,925	2377,41		305,40	31142,13	171,85						
4	10	16/03/2016	30/03/2016	15,25	182,65	0,005	12,874	2349,43	2400,17	340,00	34670,35	189,81	199,62	14	80	95,06	90	
5				15,10	179,08	0,005	13,172	2451,81		367,20	37443,98	209,09						
6				15,20	181,46	0,005	13,061	2399,26		355,80	36281,50	199,94						
4	20	16/03/2016	30/03/2016	15,08	178,60	0,005	13,172	2458,32	2392,35	274,10	27950,42	156,49	160,39	14	80	76,37	90	
5				15,15	180,27	0,005	12,762	2359,84		294,70	30051,04	166,70						
6				15,23	182,18	0,005	12,892	2358,90		282,20	28776,39	157,96						
4	35	17/03/2016	31/03/2016	15,25	182,65	0,005	12,887	2351,80	2362,67	191,50	19527,57	106,91	115,34	14	80	54,92	90	
5				15,19	181,22	0,005	12,758	2346,69		207,70	21179,51	116,87						
6				15,21	181,70	0,005	13,025	2389,51		217,80	22209,42	122,23						



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 27. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 28 días de edad.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 																	
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA																	
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 28 DÍAS DE EDAD																	
LUGAR:		LABORATORIOS DE LA FICM								NORMA		NTE INEN 1573 - ASTM C 39					
REALIZADO POR:		Egdo. Roberto Rodríguez								ALTURA DE CILINDRO [m]:		0,3					
PROBETA N°	% DE METACAOLÍN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO [cm]	ÁREA [cm ²]	VOLUMEN [m ³]	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m ³]	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR [%]	VALOR OBTENIDO [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]
										KN	KG						
7	0	16/03/2016	13/04/2016	15,25	182,65	0,005	12,838	2342,86	2354,05	390,40	39809,72	217,95	214,96	28	95	102,36	105
8				15,37	185,54	0,006	12,973	2330,67		380,80	38830,79	209,29					
9				15,20	181,46	0,005	13,003	2388,61		387,30	39493,61	217,65					
7	10	16/03/2016	13/04/2016	15,25	182,65	0,005	13,264	2420,60	2374,39	485,30	49486,83	270,93	269,15	28	95	128,17	105
8				15,36	185,30	0,006	13,127	2361,41		490,50	50017,08	269,93					
9				15,23	182,18	0,005	12,795	2341,15		476,30	48569,08	266,61					
7	20	16/03/2016	13/04/2016	15,25	182,65	0,005	12,805	2336,84	2342,54	331,50	33803,59	185,07	185,44	28	95	88,30	105
8				15,19	181,22	0,005	12,613	2320,02		346,40	35322,97	194,92					
9				15,15	180,27	0,005	12,821	2370,75		311,70	31784,55	176,32					
7	35	17/03/2016	14/04/2016	15,22	181,94	0,005	12,880	2359,80	2346,57	296,30	30214,19	166,07	172,35	28	95	82,07	105
8				15,20	181,46	0,005	12,644	2322,66		318,60	32488,16	179,04					
9				15,23	182,18	0,005	12,883	2357,25		307,20	31325,68	171,95					

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 28. Resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón simple y añadido metacaolín a los 60 días de edad.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 																	
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA																	
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 60 DÍAS DE EDAD																	
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM										NORMA		NTE INEN 1573 - ASTM C 39				
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez										ALTURA DE CILINDRO [m]:		0,3				
PROBETA N°	% DE METACAOLÍN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO [cm]	ÁREA [cm ²]	VOLUMEN [m ³]	PESO [Kg]	DENSIDAD [Kg/m ³]	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR [%]	VALOR OBTENIDO [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]
										KN	KG						
10	0	16/03/2016	16/05/2016	15,26	182,89	0,005	12,99	2367,49	2367,46	486,20	49578,60	271,08	269,83	60	115	128,49	125
11				15,30	183,85	0,006	13,05	2366,01		500,10	50996,01	277,37					
12				15,32	184,33	0,006	13,10	2368,88		471,90	48120,41	261,05					
10	10	16/03/2016	16/05/2016	15,25	182,65	0,005	12,785	2333,19	2334,25	602,12	61399,15	336,15	335,04	60	115	159,54	125
11				15,27	183,13	0,005	12,815	2332,54		599,60	61142,18	333,87					
12				15,25	182,65	0,005	12,806	2337,02		600,23	61206,43	335,09					
10	20	16/03/2016	16/05/2016	15,25	182,65	0,005	12,941	2361,66	2347,40	342,20	34894,69	191,04	195,49	60	115	93,09	125
11				15,20	181,46	0,005	12,736	2339,56		350,60	35751,25	197,02					
12				15,30	183,85	0,006	12,912	2340,99		357,70	36475,25	198,39					
10	35	17/03/2016	16/05/2016	15,14	180,03	0,005	12,939	2395,73	2375,08	326,00	33242,75	184,65	182,94	60	115	87,12	125
11				15,22	181,94	0,005	12,912	2365,66		319,40	32569,74	179,02					
12				15,23	182,18	0,005	12,919	2363,84		330,80	33732,21	185,16					

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

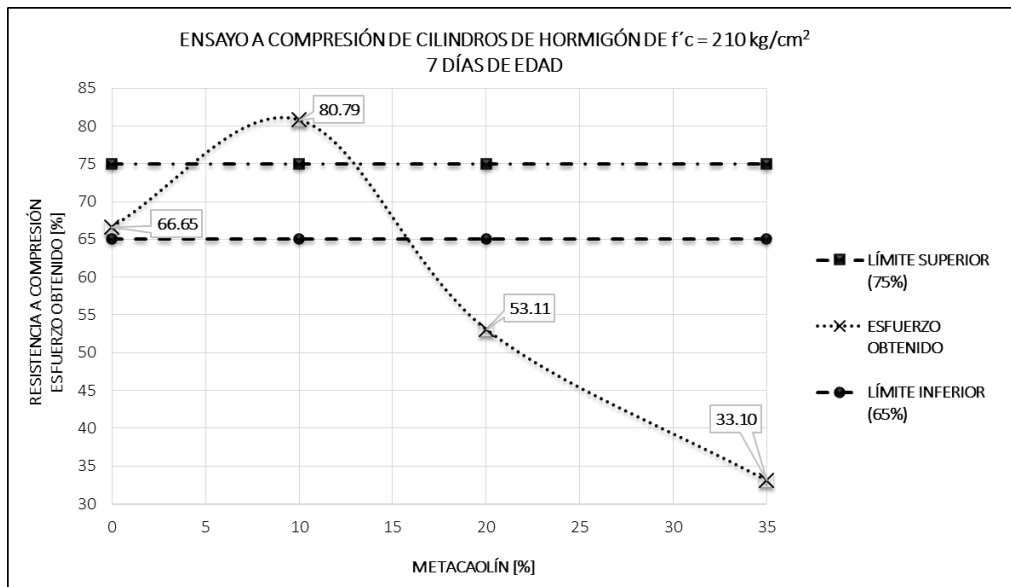
RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla 29. Resumen de esfuerzos obtenidos.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		NORMA: NTE INEN 1573 - ASTM C 39		
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA		ALTURA DEL CILINDRO [m]: 0,3		
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM			
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez			
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 7 DÍAS DE EDAD				
% DE METACAOLÍN	LÍMITE INFERIOR [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]	METACAOLÍN	
			ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO OBTENIDO [%]
0	65	75	139,96	66,65
10	65	75	169,65	80,79
20	65	75	111,53	53,11
35	65	75	69,51	33,10

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez



Gráfico 1. Compresión de cilindros a los 7 días de curado



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

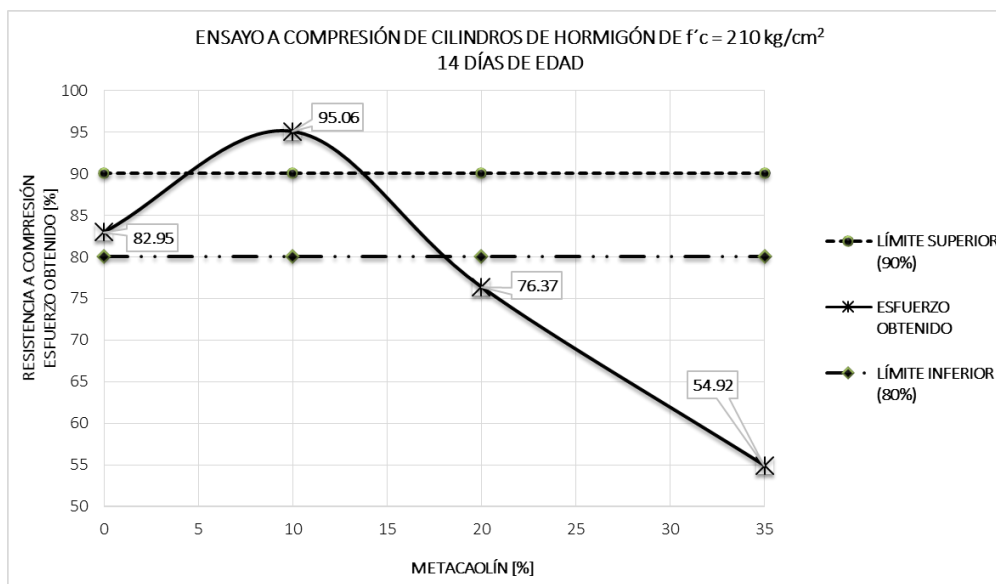
INTERPRETACIÓN: El hormigón común se mantiene dentro de los rangos establecidos para los diferentes días de curado, sin embargo el hormigón con adiciones del 10% de metacaolín presenta una mejoría en su resistencia de 5.79% respecto al límite superior (75%), y al aumentar metacaolín al hormigón (20% y 35%) su resistencia decrece.

Tabla 30. Resumen de esfuerzos obtenidos.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM		NORMA:	NTE INEN 1573 - ASTM C 39
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez		ALTURA DEL CILINDRO [m]:	0,3
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 14 DÍAS DE EDAD				
% DE METACAOLÍN	LÍMITE INFERIOR [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]	METACAOLÍN	
			ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO OBTENIDO [%]
0	80	90	174,20	82,95
10	80	90	199,62	95,06
20	80	90	160,39	76,37
35	80	90	115,34	54,92

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Gráfico 2. Compresión de cilindros a los 14 días de curado



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

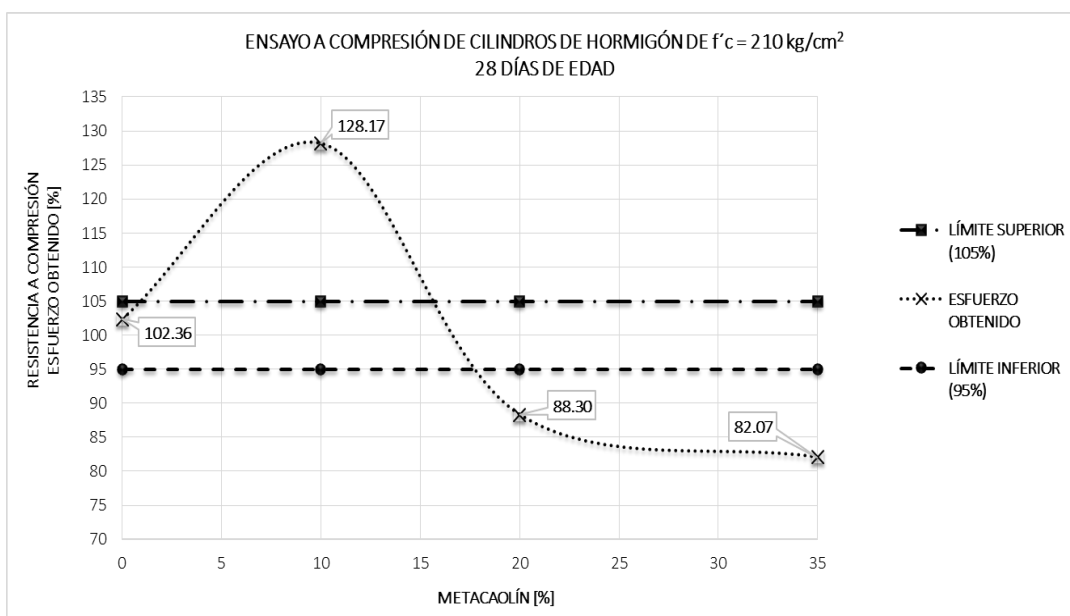
INTERPRETACIÓN: La resistencia a la compresión del hormigón con adición del 10% de metacaolín, aumenta con relación al límite superior para hormigones de 210 kg/cm² a los 14 días de curado a 95.06%, y respecto al hormigón añadido el 20% de metacaolín su resistencia baja en un 3.63% comparándolo con el límite inferior.

Tabla 31. Resumen de esfuerzos obtenidos.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		NTE INEN 1573 - ASTM C 39		
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM	NORMA:		
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	ALTURA DEL CILINDRO [m]: 0,3		
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 28 DÍAS DE EDAD				
% DE METACAOLÍN	LÍMITE INFERIOR [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]	METACAOLÍN	
			ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO OBTENIDO [%]
0	95	105	214,96	102,36
10	95	105	269,15	128,17
20	95	105	185,44	88,30
35	95	105	172,35	82,07

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Gráfico 3. Compresión de cilindros a los 28 días de curado



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

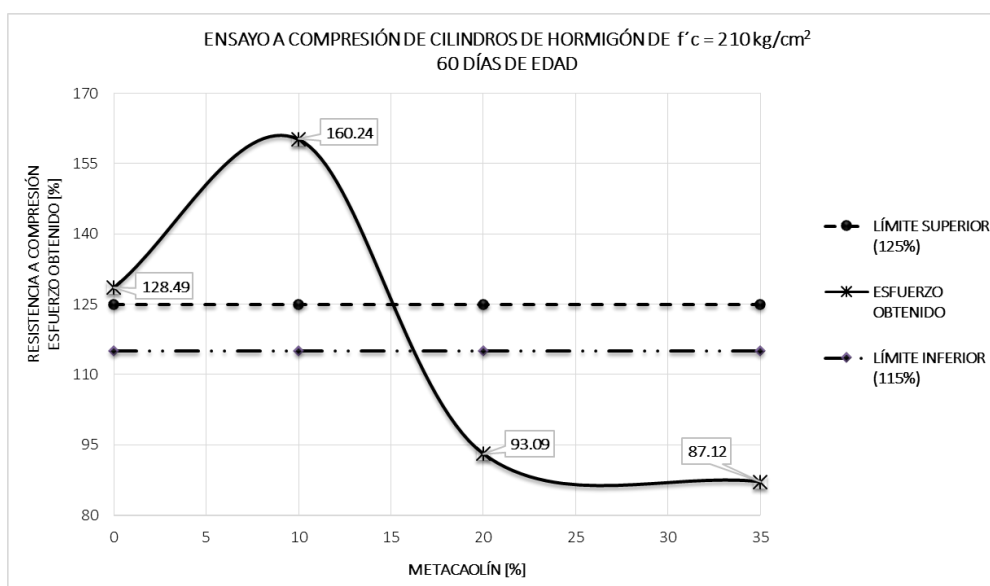
INTERPRETACIÓN: A esta edad de curado un hormigón sin adiciones presenta la resistencia esperada (210 Kg/cm²), mientras que la resistencia alcanzada con el hormigón con adiciones del 10% de matacaolín fue mayor, lo que no ocurre con las otra 2 adiciones de 20% y 35% que tienen pérdida de resistencia de 7.05% y 12.61% respectivamente.

Tabla 32. Resumen de esfuerzos obtenidos.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		NORMA: NTE INEN 1573 - ASTM C 39		
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN ANADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM	NORMA: NTE INEN 1573 - ASTM C 39		
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez	ALTURA DEL CILINDRO [m]: 0,3		
ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN DE $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ A LOS 60 DÍAS DE EDAD				
% DE METACAOLÍN	LÍMITE INFERIOR [%]	LÍMITE SUPERIOR [%]	METACAOLÍN	
			ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO OBTENIDO [%]
0	115	125	269,83	128,49
10	115	125	335,04	160,24
20	115	125	195,49	93,09
35	115	125	182,94	87,12

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

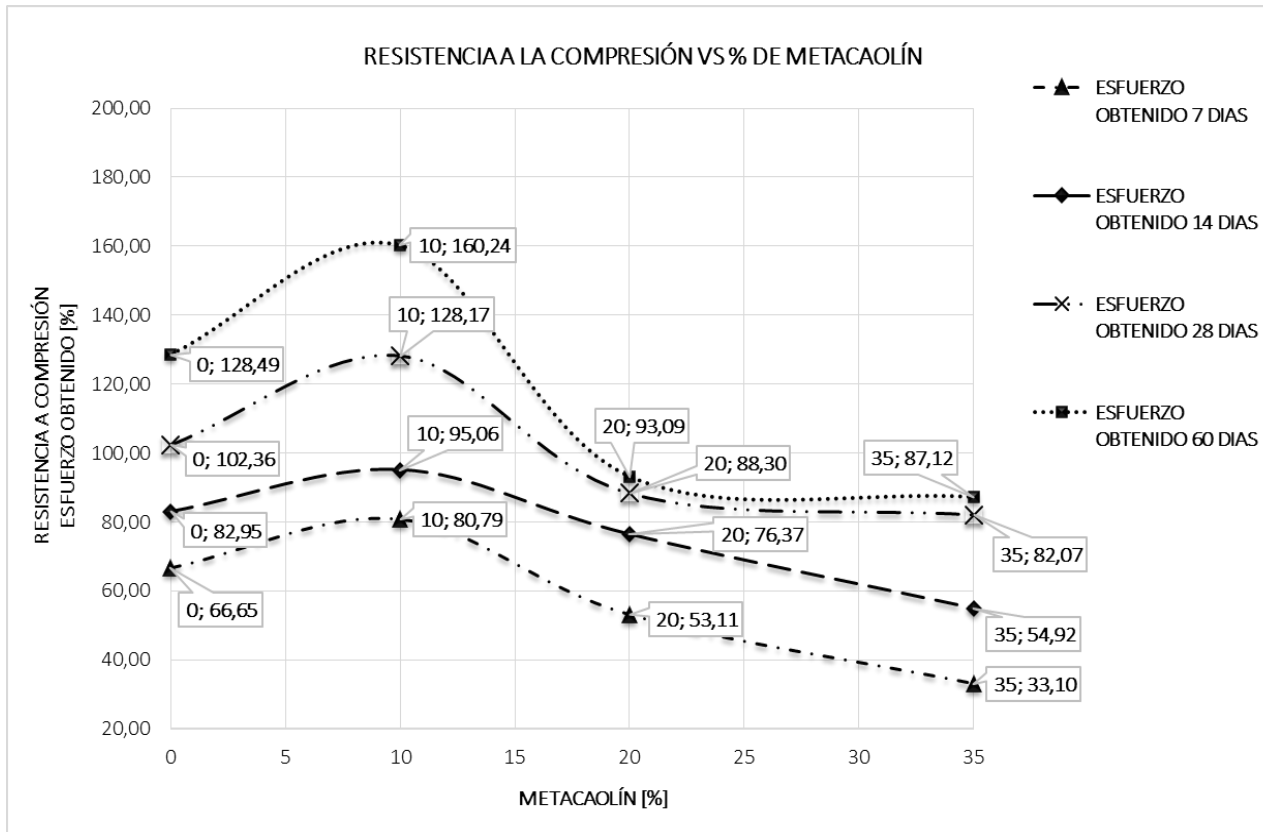
Gráfico 4. Compresión de cilindros a los 60 días de curado.



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

INTERPRETACIÓN: A la edad de 60 días la resistencia a la compresión respecto a los límites es mayor en el hormigón con adiciones de 10% de metacaolín, y comparándolo con el límite superior (125%) se obtiene 160.24%; es decir, un esfuerzo mucho mayor, evidenciando claramente que el metacaolín ayuda a incrementar la resistencia del hormigón.



Gráfico 5. Resultado general del ensayo a compresión de los cilindros de hormigón simple y hormigón con metacaolín comparado con los límites establecidos para diferentes días de curado.



INTERPRETACIÓN: Se evidencia en todas las curvas que al pasar los días de curado el hormigón con adiciones del 10% aumenta su esfuerzo en comparación con el límite superior establecido para 60 días (125%), hasta lograr un esfuerzo superior de 160%, y al aumentar los porcentajes de metacaolín se obtiene pérdida de resistencia.

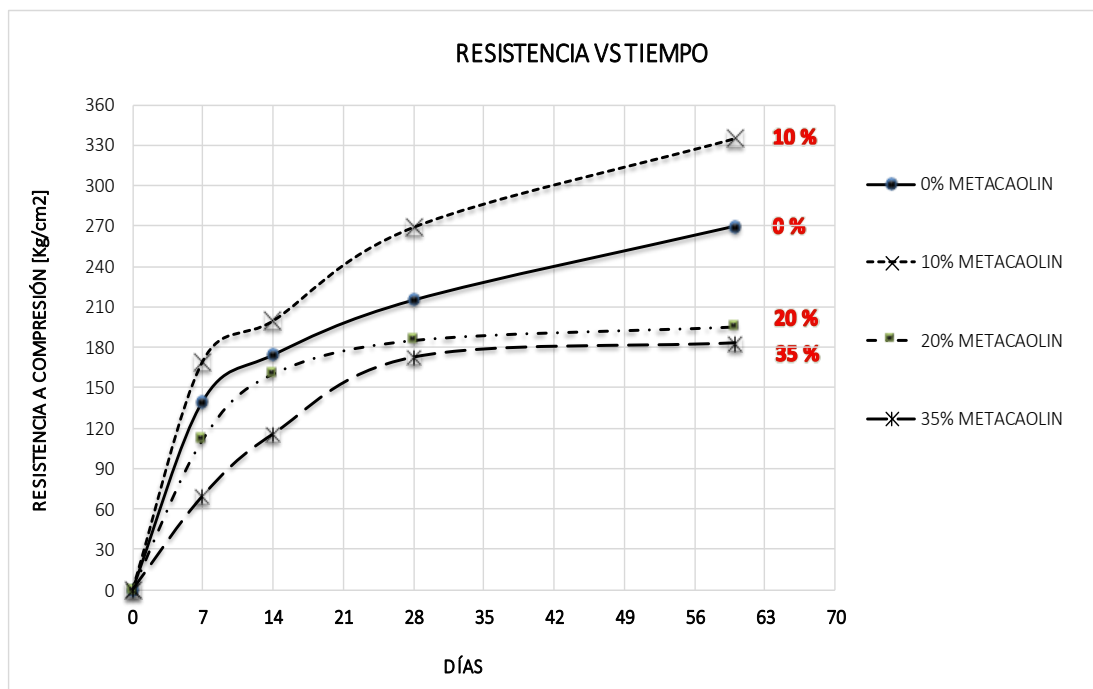
Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 33. Esfuerzos a diferentes edades de curado.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA				
LUGAR:	LABORATORIOS DE LA FICM			
REALIZADO POR:	Egdo. Roberto Rodríguez			
	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]	ESFUERZO MEDIO [Kg/cm ²]
PORCENTAJE DÍAS	0%	10%	20%	35%
7	139,96	169,65	111,53	69,51
14	174,20	199,62	160,39	115,34
28	214,96	269,15	185,44	172,35
60	269,83	336,50	195,49	182,94

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

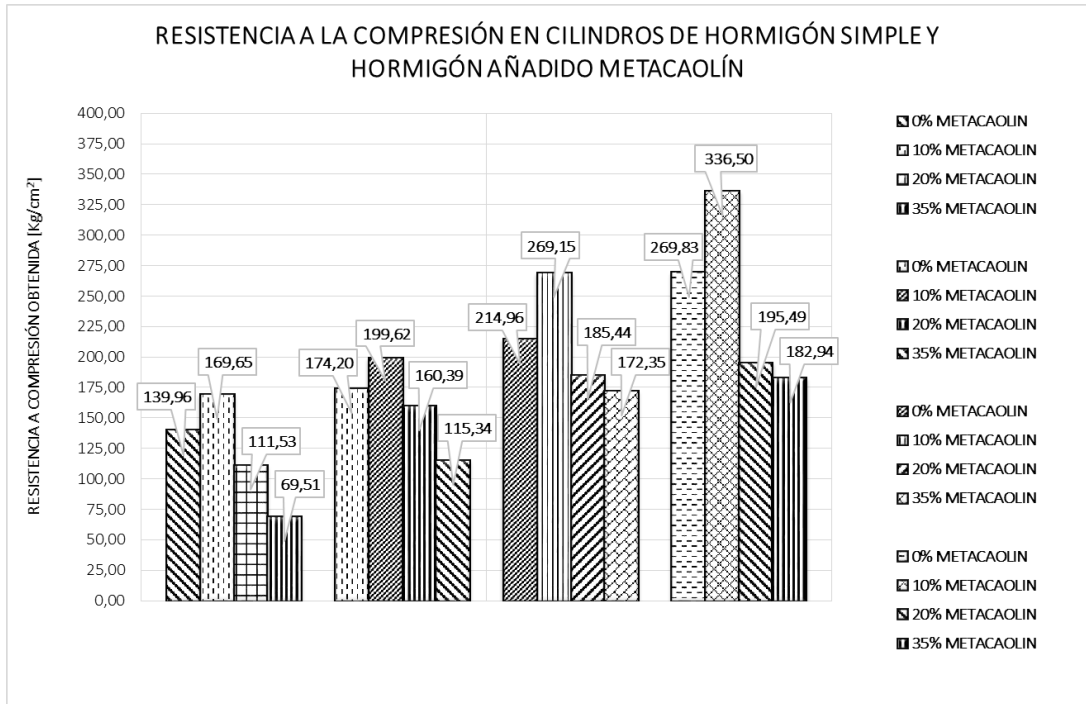
Gráfico 6. Resistencia vs Tiempo (curado)



Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

INTERPRETACIÓN: Lo que se ha logrado al añadir metacaolín en lugar de cemento en ciertos porcentajes a las muestras de hormigón, es un aumento en sus resistencias, determinándose que el porcentaje óptimo es de 10% para obtener un buen hormigón lo que se comprobó con su resistencia a la compresión que fue superada. (Resistencia a la compresión planteada a los 28 días 210 Kg/cm² - Resistencia alcanzada con el metacaolín 269.15 Kg/cm²).

Gráfico 7. Resumen de las resistencias alcanzadas en los diferentes días de curado.





Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

INTERPRETACIÓN: Es importante recalcar las resistencias a la compresión de los hormigones añadidos el 10% de metacaolín ya que estos esfuerzos desde el día 7 siguieron aumentando hasta los 60 días, las resistencias alcanzadas fueron de 169.65 Kg/cm² hasta el día 60 de 336.50 Kg/cm². A porcentajes mayores de metacaolín las resistencias crecen pero son inferiores en todos los límites planteados para los hormigones a diferentes días de curado.



4.2.3. Análisis de Precios.

Tabla 34. Hormigón Convencional

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA 														
TEMA: COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON AÑADIDO METACAO LÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS EXISTENTES EN LA PROVINCIA DE PASTAZA														
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS				HOJA 1 DE 1										
DETALLE : H.Simple 210kg/cm ²				UNIDAD: m ³										
EQUIPO <i>DESCRIPCION</i>	CANTIDAD <i>A</i>	TARIFA <i>B</i>	COSTO HORA <i>C=AxB</i>	RENDIMIENTO <i>R</i>	COSTO <i>D=CxR</i>									
Herramienta Menor 2% de M.O.					1.57									
Concretera 1 saco	1.00	5.00	5.00	1.400	7.00									
SUBTOTAL M					8.57									
MANO DE OBRA <i>DESCRIPCION</i>	CANTIDAD <i>A</i>	JORNAL/HR <i>B</i>	COSTO HORA <i>C=AxB</i>	RENDIMIENTO <i>R</i>	COSTO <i>D=CxR</i>									
Peón EO E2	4.00	3.26	13.04	2.800	36.51									
Ayudante EO E2	3.00	3.26	9.78	2.800	27.38									
Albañil/Carpintero EO D2	1.00	3.30	3.30	2.800	9.24									
Maestro Mayor EO C1	0.50	3.66	1.83	2.800	5.12									
SUBTOTAL N					78.25									
MATERIALES <i>DESCRIPCION</i>	UNIDAD	CANTIDAD <i>A</i>	PRECIO UNIT. <i>B</i>	COSTO <i>C=AxB</i>										
Cemento Portland	saco	7.000	7.05	49.35										
Pétreos,arena negra	m3	0.590	5.00	2.95										
Pétreos,ripio triturado	m3	0.660	14.00	9.24										
Agua	Lt	200.000	0.01	2.00										
SUBTOTAL O				63.54										
TRANSPORTE <i>DESCRIPCION</i>	UNIDAD	CANTIDAD <i>A</i>	TARIFA <i>B</i>	COSTO <i>C=AxB</i>										
SUBTOTAL P				0.00										
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)</td> <td style="text-align: right;">150.36</td> </tr> <tr> <td>INDIRECTOS (%)</td> <td style="text-align: right;">0.00%</td> </tr> <tr> <td>UTILIDAD (%)</td> <td style="text-align: right;">0.00%</td> </tr> <tr> <td>COSTO TOTAL DEL RUBRO</td> <td style="text-align: right;">150.36</td> </tr> <tr> <td>VALOR UNITARIO</td> <td style="text-align: right;">150.36</td> </tr> </table>					TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	150.36	INDIRECTOS (%)	0.00%	UTILIDAD (%)	0.00%	COSTO TOTAL DEL RUBRO	150.36	VALOR UNITARIO	150.36
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)	150.36													
INDIRECTOS (%)	0.00%													
UTILIDAD (%)	0.00%													
COSTO TOTAL DEL RUBRO	150.36													
VALOR UNITARIO	150.36													
SON: CIENTO CINCUENTA DÓLARES CON TREINTA Y SEIS CENTAVOS ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA														
FECHA: MAYO / 2016				ROBERTO RODRIGUEZ ELABORADO										

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

Tabla 35. Hormigón Añadido Metacaolín

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
TEMA: COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON AÑADIDO METACAOLÍN COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO, UTILIZANDO LOS AGREGADOS					
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				HOJA 1 DE 1	
DETALLE : H.Simple 210kg/cm ² añadido Metacaolin				UNIDAD: m ³	
EQUIPO DESCRIPCION	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Herramienta Menor 2% de M.O.					1.57
Concretera 1 saco	1.00	5.00	5.00	1.400	7.00
SUBTOTAL M					8.57
MANO DE OBRA DESCRIPCION	CANTIDAD A	JORNAL/HR B	COSTO HORA C=AxB	RENDIMIENTO R	COSTO D=CxR
Peón EO E2	4.00	3.26	13.04	2.800	36.51
Ayudante EO E2	3.00	3.26	9.78	2.800	27.38
Albañil/Carpintero EO D2	1.00	3.30	3.30	2.800	9.24
Maestro Mayor EO C1	0.50	3.66	1.83	2.800	5.12
SUBTOTAL N					78.25
MATERIALES DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=AxB	
Cemento Portland	saco	6.000	7.05	42.30	
Pétreos, arena negra	m3	0.590	5.00	2.95	
Pétreos, ripio triturado	m3	0.660	14.00	9.24	
Agua	Lt	200.000	0.01	2.00	
Metacaolin	saco	1.500	12.00	18.00	
SUBTOTAL O				74.49	
TRANSPORTE DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=AxB	
SUBTOTAL P				0.00	
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)				161.31	
INDIRECTOS (%)				0.00	
UTILIDAD (%)				0.00	
COSTO TOTAL DEL RUBRO				161.31	
VALOR UNITARIO				161.31	
SON: CIENTO SESENTA Y UN DÓLARES CON TREINTA Y UN CENTAVOS ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN IVA					
FECHA: MAYO / 2016				ROBERTO RODRIGUEZ ELABORADO	

Fuente: Egdo. Roberto Rodríguez

INTERPRETACIÓN: El hormigón adicionado metacaolín resultó ser más costoso que el hormigón tradicionalmente utilizado, pero si nos ponemos a comparar las resistencias que se lograron obtener con este primer hormigón mencionado, es evidente que se ha logrado superar la resistencia que el hormigón común alcanza a los 28 días de curado (210 Kg/cm²).

De cierta manera podemos comparar los precios con un hormigón de una resistencia de 240 Kg/cm² que está alrededor de 100 dólares por m³, y el hormigón elaborado en esta investigación, que sin cambiar su estructura lo sustituiría, ya que a los 28 días de curado se obtiene una resistencia 269,15 Kg/cm².

4.3. Verificación de la hipótesis

La hipótesis planteada es correcta, la cual se verificó a través de los ensayos de compresión a las probetas cilíndricas de hormigón simple y añadido metacaolín, evidenciándose que al sustituir en cierto porcentaje al cemento con metacaolín este hace que el hormigón mejore sus propiedades físicas y mecánicas (Trabajabilidad, Consistencia, Resistencia, Durabilidad), lo cual se verificó que al añadirle el 10% de metacaolín, el hormigón presenta mayores esfuerzos a compresión con relación al hormigón común de un 25% a 30%.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se determinó que el hormigón con adiciones del 10% de metacolín mejoró sus propiedades tanto físicas como mecánicas, es decir, su consistencia fue buena, la misma que está relacionada con su trabajabilidad, y la resistencia a la compresión fue mayor a los 28 días de curado siendo esta de 269,15 Kg/cm².
- El hormigón con adición del 10% de metacaolín a los 60 días de curado incrementó la resistencia a compresión en un rango de 25% a 30% respecto al hormigón convencional, pero al añadir mayores porcentajes de metacaolín las resistencias disminuyen.
- La porosidad en las probetas cilíndricas es mínima, por el manejo que se le dio al hormigón en estado fresco, es decir, una buena compactación (vibrador), y los agregados empleados cumplieron con los requerimientos de los ensayos realizados.
- Las muestras se elaboraron con caolín amarillento, esta adición no cambio la coloración típica del hormigón; a diferencia de lo citado bibliográficamente respecto al caolín blanco, que le da una coloración blanca al hormigón.
- El hormigón con adición de metacaolín al presentar mayores resistencias que un hormigón común, está siendo empleado en Cuba y Paraguay, en la construcción de columnas en edificios, plataformas marítimas, viviendas, metros, puentes, túneles, torres de enfriamiento, entre otros, según la investigación como tema Factibilidad Técnica Económica de la Utilización del Metacaolín en Estructuras de HAD (Hormigón de alto desempeño).
- El costo del hormigón con adiciones de metacaolín resultó ser 7.28% más caro que el hormigón convencional, pero la resistencia que alcanza dicho hormigón el alta.

5.2. Recomendaciones

- Es necesario realizar futuros proyectos experimentales para tener más información sobre la resistencia que puede alcanzar el hormigón añadiendo metacaolín.
- El curado debe realizarse de acuerdo a lo establecido en la Norma ASTM C511 (INEN 2528), en una humedad constante entre 95 y 100% y a una temperatura de 23 ± 2 °C, en estas condiciones se logran alcanzar las mejores resistencias.
- Determinar el contenido de humedad de los agregados un día antes de la elaboración del hormigón ya que si se realiza muchos días antes las condiciones de los agregados se van a ver afectadas por las condiciones climáticas que afectan la resistencia del hormigón y la corrección por humedad ya no sería la misma.
- Los moldes deben ser recubiertos con una capa de aceite delgada y en el fondo no debe acumular aceite ya que el exceso puede afectar la resistencia de los hormigones (ASTM C31).
- Las muestras deben enrasarse con un palustre para garantizar una superficie lisa y uniforme de manera que se logre una distribución uniforme de las cargas sobre las probetas.
- Se recomienda, a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, continuar con estudios relacionados a hormigones adicionados utilizando otras puzolanas, para determinar su comportamiento ante las distintas sollicitaciones que se presentan en las estructuras.

MATERIALES DE REFERENCIA

1. Bibliografía

- [1] I. Castillo, «Estudio de factibilidad económico-financiera de la producción de metakaolín y su utilización en la producción de cemento en la fábrica de cemento de Siguaney, Sancti Spíritus.,» Santa Clara-Cuba, 2012.
- [2] J. Iván Escalante, «Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza,» *ALCONPAT*, vol. 1, pp. 156 - 169, 2011.
- [3] Rafik Abbas, «Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: mortero y hormigón,» Egipto, 2010.
- [4] Janneth Torres Agredo, «Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado,» Bogotá, 2011.
- [5] R. Martinez, «FACTIBILIDAD TECNICA ECONOMICA DE LA UTILIZACIÓN DEL METACAOLÍN EN ESTRUCTURAS DE HAD».
- [6] M. ESPERANZA, «DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ROTURA EN VIGAS DE HORMIGÓN, FABRICADO CON MATERIALES PROCEDENTES DE LA CANTERA SAN ROQUE, PARA $f'c = 28$ MPa.,» Quito, 2014.
- [7] lafarge, «<http://www.lafarge.com.ec/guiahormigon.pdf>,» [En línea].
- [8] Norma UNE-EN 197-1, Composición, especificaciones y criterios de conformidad con los cementos comunes, España: AENOR, 2000.
- [9] J. BARTOLOMÉ, «El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones,» Madrid.
- [10] QuimiNet, «www.QuimiNet.com/articulos/que-es-el-caolin-4174.htm,» 04 Enero 2005.
- [11] M. Morán, «Cementos - Hormigón armado,» Barcelona, 2000.
- [12] Ing. Acuña Lorena, «ELABORACIÓN DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA UTILIZANDO METACAOLÍN DE PRODUCCIÓN PARAGUAYA,» San Lorenzo – Paraguay.
- [13] (GIQUIMA), «EL FACTOR DE EFICACIA CEMENTANTE DE PUZOLANAS SILÍCEAS Y SILICOALUMINOSAS MUY REACTIVAS.,» Valencia, 2002.

- [14] JUAN CAMILO RESTREPO GUTIÉRREZ, «EFECTOS DE LA ADICIÓN DE METACAOLÍN EN EL CEMENTO PÓRTLAND,» Medellín, 2006.
- [15] Association for Testing Materials. ASTM, Especificaciones normalizadas para agregados en el concreto.
- [16] ASTM C-125, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, CrossRef.
- [17] NTE INEN 0856, Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino, Quito, 2010.
- [18] NTE INEN 0858, Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos, Quito, 2010.
- [19] ASTM. Association for Testing Materials, Especificación estándar para tela de alambre y tamices para propósitos de prueba.
- [20] S. Lenin, «Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras De Acero y su Influencia en sus Propiedades Mecánicas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua,» Ambato, 2014.
- [21] NTE INEN 0857, «Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de árido grueso,» Quito, 2010.
- [22] ASTM C-131, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, West Conshohocken.PA, 206.
- [23] S. Medina, Ensayo de Materiales II, Ambato.
- [24] A. Arequipa, «Aceros Arequipa,» 2011. [En línea]. Available: http://www.acerosarequipa.com/maestro-de-obra/boletin-construyendo/edicion_17/capacitaciones-procedimientos-para-elaborar-probetas-de-concreto.html.
- [25] American Society for Testing and Materials, Standard Practice for Laboratories Testing Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation, 2010.
- [26] A. Schafer, «Deformación elástica, plástica y fatiga».
- [27] M. R. Proaño, Temas de Hormigón Armado, Quito, Pichincha.

- [28] T. Harmsent, Diseño de Estructuras de Concreto Armado 4ta edición, 2005.
- [29] NTE INEN 0872, Áridos para hormigón, requisitos, BRUTUM FULMEN, 2011.
- [30] National Ready Mixed Concrete Association, «Hormigón. El concreto en la Práctica,» 900 Spring St..
- [31] Association for Testing Materials, «ASTM C 31-Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field,» CrossRef, West Conshohocken, 2012.
- [32] U. C. d. Ecuador, «Dosificación del hormigón,» Quito.
- [33] M. Garzón, «Investigación sobre el Módulo de Elasticidad del Hormigón,» Quito, 2010.
- [34] Cristhian Camilo Montaña Muñoz, «Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al ión cloruro vs la relación agua cemento,» Bogotá.
- [35] CORONA» <http://www.corona.co> » Colombia » Beneficios en el uso de metacaolín de alta reactividad de corona® en las mezclas de hormigón.

2. Anexos

2.1 Fotografías del desarrollo de la investigación.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL RIPIO Y ARENA



Peso Ripio Tamizado



Arena Tamizada



Canastilla



Mezcla de Ripio y Arena



Ripio estado SSS



Peso del Ripio en los recipientes

PROCESO DEL CAOLÍN PARA SU TRANSFORMACIÓN A METACAOLÍN



Ladrillera Tirado



Caolín Amarillento



Silo



Molino



Material Obtenido



Horno a leña



Máquina de los Angeles



Material obtenido (metacaolín)

DENSIDAD REAL DEL CEMENTO Y METACAOLÍN



Peso del cemento



Gasolina



Peso cemento + gasolina



Agua



Metacaolín



Metacaolín + agua

ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN PARA LAS MUESTRAS CILÍNDRICAS



Agregados en la concreteira



Cemento y metacolín



Cilindros H° común y con metacaolín



Enrasado de los cilindros



Enrasado de cilindros



Identificación de los cilindros

ASENTAMIENTO



Cono de Abrahams



Asentamiento medido

DESENCOFRADO Y CURADO DE LOS CILÍNDROS

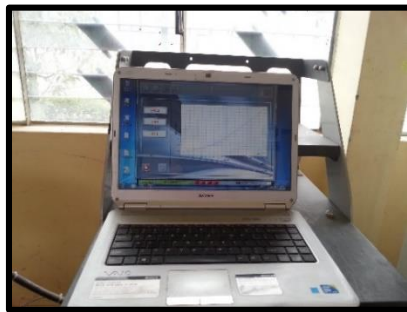


Desencofrado

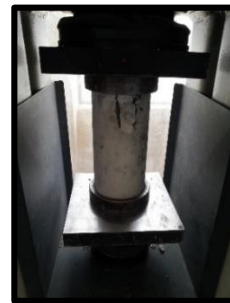


Cámara de curado para cilindros

ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILÍNDROS



Programa para el ensayo



Máquina de compresión



Ensayo a los 7 días



Ensayo a los 14 días



Ensayo a los 28 días



Ensayo a los 60 días

2.2 Especificaciones del caolín

Análisis químico	
	%
K ₂ O.....	0,60 ± 0,30
Al ₂ O ₃	36,50 ± 0,80
Fe ₂ O ₃	0,50 ± 0,05
SiO ₂	49,00 ± 1,00
TiO ₂	0,15 ± 0,05
CaO.....	0,10 ± 0,05
Pérdida por calcinación	12,80 ± 0,30
Análisis Granulométrico:	
45 Pm	0,08 ± 0,05
10 Pm.....	96,00 ± 1,00
2 Pm.....	58,00 ± 1,00
pH	7,5 - 8,0
Características Físicas:	
Resistencia mecánica:.....	3 ± 1 Kg/cm ² (a 110°C) Blancura
(seco).....	85,20 ± 0,50

Fuente: SISECOL (Soluciones Integrales de Sistemas Ecológicos – Tamizadora de Minerales.