

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**



**CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo Experimental**

**TEMA:**

---

**“LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO”**

---

**AUTORA: Lourdes Gabriela Peñafiel Valla**

**AMBATO – ECUADOR**

**2016**

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente proyecto de investigación con el tema : “**LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO**” realizado por la Srta. Lourdes Gabriela Peñafiel Valla es un trabajo inédito y personal de su autor, que estuvo bajo mi dirección.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

---

Ing. M. Sc. JORGE W. CEVALLOS C.

**TUTOR**

# **AUTORÍA**

Yo, Lourdes Gabriela Peñafiel Valla, C.I. 180442022-0, egresada de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato certifico que el contenido del presente trabajo investigativo así como las ideas y opiniones son de mi completa autoría a excepción de las citas bibliográficas.

---

LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de calificación de grado aprueban el Trabajo Experimental, sobre el tema: **“LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO”** elaborado por la Srta. Lourdes Gabriela Peñafiel Valla, Egresada de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

.....  
Ing. Víctor Hugo Paredes

.....  
Ing. Francisco Pazmiño

## **DEDICATORIA**

El presente Trabajo Experimental se lo dedico a mi madre por ser la persona que ha guiado mis pasos durante mi vida con amor, dedicación y un esfuerzo admirable. A mis hermanos por su apoyo y aliento para ser cada día una mejor persona.

*Gabriela Peñafiel*

# AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre por su apoyo durante mi vida y ahora durante el desarrollo de este trabajo y a mis hermanos que de alguna manera hicieron posible la realización de esta meta.

Agradezco a mi abuelita Efigenia por haberme apoyado sin ningún interés.

Gracias a mi hermano Leonardo por haber creído en mí y brindarme su apoyo. Por la gentileza que tuviste de brindarme un hogar y apoyarme en mi vida adulta te agradezco querido hermano.

Agradezco al Ing. Jorge Cevallos porque durante mi carrera estudiantil supo ser un buen maestro quien me brindó sus conocimientos de manera desinteresada, y además ha sabido guiar mis pasos durante el transcurso de este trabajo.

Gracias al ingeniero Marco Paucar por su apoyo profesional y su guía desinteresada.

Gracias a todos.

<b>A. PÁGINAS PRELIMINARES.....</b>	<b>I</b>
CERTIFICACIÓN .....	I
AUTORÍA.....	II
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
RESUMEN EJECUTIVO .....	XII
<b>B. TEXTO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1    TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	1
1.2    ANTECEDENTES.....	1
1.2.1    Investigaciones de uso del catalizador agotado como componente del hormigón <sup>2</sup>	
1.3    JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4    OBJETIVOS .....	7
1.4.1    General .....	7
1.4.2    Específicos .....	7
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>8</b>
<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>8</b>
2.1    DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE.....	8
2.2.1    Componentes del Hormigón .....	8
2.2.2    Áridos.....	14
2.2.3    Agua .....	18
2.2.4    Aditivos.....	18
2.2.5    Propiedades mecánicas del hormigón .....	19
2.2.6    Catalizador agotado .....	25
2.2.7    Estructura del Catalizador .....	26
2.2.8    Descripción general del proceso de craqueo catalítico .....	27
2.2.9    Importancia de la unidad de craqueo catalítico fluidizado en las refinerías ...	27
2.2.10    Fuentes de catalizador gastado en Ecuador.....	28
2.2.11    Consumo de catalizador en refinería Esmeraldas .....	29
2.2.12    Especificaciones del catalizador fresco adquirido por refinería .....	30
2.2.13    Producción de cemento En Ecuador .....	31
2.3    HIPÓTESIS.....	32
2.4    SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS .....	32

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>33</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>33</b>
3.1    NIVEL O TIPO DE LA INVESTIGACIÓN .....	33
3.1.1    Correlacional .....	33
3.1.2    Nivel Explicativo.....	33
3.2    POBLACIÓN Y MUESTRA .....	33
3.2.1    Justificación de la muestra.....	34
3.3    PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	36
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>38</b>
<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
4.1    Ensayos realizados en los agregados .....	38
4.1.1    Datos químicos del catalizador agotado.....	38
4.1.2    Agregado fino.....	38
4.1.3    Agregado Grueso.....	38
4.1.4    Dosificación de hormigones: Método de Dosificación de Hormigones según la Universidad Central del Ecuador.....	45
4.1.5    Determinación del Peso específico del Hormigón fresco.....	56
4.1.6    Peso específico del hormigón endurecido a los 28 días de edad .....	61
4.1.7    Resistencia a la compresión del hormigón endurecido a los 28 .....	65
4.2    ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	69
4.2.1    Propiedades mecánicas del hormigón fresco .....	69
4.2.2    Análisis de las densidades en estado fresco de las probetas.....	72
4.2.3    Peso específico endurecido (densidad endurecida) del hormigón a los 28.....	75
4.2.4    Comparación entre densidades en estado fresco y endurecido .....	77
4.2.5    Resistencia a la compresión del hormigón adicionado con catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado.....	81
4.3    VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	87
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>89</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
5.1    CONCLUSIONES .....	89
5.2    RECOMENDACIONES .....	92
<b>C. MATERIALES DE REFERENCIA .....</b>	<b>94</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>94</b>
ANEXOS .....	96



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Figura 1.</b> Progreso de la hidratación de una partícula de cemento.....	14
<b>Figura 2.</b> Estructura interna del hormigón fresco y endurecido.....	14
<b>Figura 3.</b> Composición de un hormigón endurecido.....	22
<b>Figura 4.</b> Ejemplo de la determinación del Módulo de elasticidad de diferentes muestras de hormigón endurecido .....	23
<b>Figura 5.</b> Ubicación de Refinería Estatal Esmeraldas.....	28
<b>Figura 6.</b> Diagrama de Procesos de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de Refinería Esmeraldas .....	30
<b>Figura 7.</b> Especificaciones químicas y físicas del catalizador fresco.....	30
<b>Figura 8.</b> Determinación de la población y muestra .....	34
<b>Figura 9.</b> Curva granulométrica agregado fino.....	40
<b>Figura 10.</b> Curva granulométrica agregado grueso.....	41
<b>Figura 11.</b> Densidad óptima de la mezcla .....	43
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de catalizador vs. Agua de amasado, reemplazo cemento y arena (210 kg/cm <sup>2</sup> ).....	69
<b>Figura 13.</b> Resistencia a la compresión vs. Relación w/c, f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> . Reemplazo del cemento.....	70
<b>Figura 14.</b> Resistencia a la compresión vs. Relación w/c, f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> . Reemplazo arena .....	70
<b>Figura 15.</b> Porcentaje de catalizador vs. Agua de amasado, reemplazo cemento y arena (280 kg/cm <sup>2</sup> ).....	71
<b>Figura 16.</b> Resistencia a la compresión vs. Relación w/c, f'c=280 kg/cm <sup>2</sup> . Reemplazo del cemento.....	71
<b>Figura 17.</b> Resistencia a la compresión vs. Relación w/c, f'c=280 kg/cm <sup>2</sup> . Reemplazo arena .....	72
<b>Figura 18.</b> Densidad en estado fresco, Hormigón f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> , reemplazo del cemento .....	72
<b>Figura 19.</b> Densidad en estado fresco, Hormigón f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> , reemplazo de la arena.....	73
<b>Figura 20.</b> Densidad en estado fresco, Hormigón f'c=280 kg/cm <sup>2</sup> , reemplazo del cemento .....	74
<b>Figura 21.</b> Densidad en estado fresco, Hormigón f'c=280 kg/cm <sup>2</sup> , reemplazo de la arena.....	74
<b>Figura 22.</b> Densidad endurecida, Hormigón f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> , reemplazo del cemento.....	75
<b>Figura 23.</b> Densidad endurecida, Hormigón f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> , reemplazo de la arena .....	75

<b>Figura 24.</b> Densidad endurecida, Hormigón $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento.....	76
<b>Figura 25.</b> Densidad endurecida, Hormigón $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena.....	76
<b>Figura 26.</b> Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .....	77
<b>Figura 27.</b> Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .....	77
<b>Figura 28.</b> Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ .....	78
<b>Figura 29.</b> Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ .....	79
<b>Figura 30.</b> Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .....	79
<b>Figura 31.</b> Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .....	80
<b>Figura 32.</b> Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ .....	80
<b>Figura 33.</b> Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ .....	81
<b>Figura 34.</b> Resistencia a la compresión del Hormigón, $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento .....	82
<b>Figura 35.</b> Curva de resistencia a la compresión del hormigón, $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento.....	82
<b>Figura 36.</b> Resistencia a la compresión del Hormigón, $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo arena..	83
<b>Figura 37.</b> Curva resistencia a la compresión del hormigón, $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo arena.....	83
<b>Figura 38.</b> Resistencia a la compresión del Hormigón, $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento .....	84
<b>Figura 39.</b> Curva resistencia a la compresión del hormigón, $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento.....	84
<b>Figura 40.</b> Resistencia a la compresión del hormigón, $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo arena...	85
<b>Figura 41.</b> Curva resistencia a la compresión del hormigón, $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo arena.....	85
<b>Figura 42.</b> Comparación entre resistencias a la compresión del hormigón sustituido con catalizador el cemento y la arena, $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	86

**Figura 43.** Comparación entre resistencias a la compresión del hormigón sustituido con catalizador el cemento y la arena,  $f^c= 280 \text{ kg/cm}^2$  .....87

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Adaptación del folleto de Ensayo de Materiales II .....	8
<b>Tabla 2.</b> Sub tipos de cementos tipo I.....	10
<b>Tabla 3.</b> Requisitos físicos normalizados del cemento .....	11
<b>Tabla 4.</b> Composición química del cemento Portland .....	12
<b>Tabla 5.</b> Tamices de la serie de Tyler para áridos finos.....	16
<b>Tabla 6.</b> Resistencia a la compresión a diferentes edades.....	21
<b>Tabla 7.</b> Propiedades químicas del catalizador agotado.....	39
<b>Tabla 8.</b> Análisis granulométrico del agregado fino .....	39
<b>Tabla 9.</b> Análisis granulométrico del agregado grueso .....	40
<b>Tabla 10.</b> Peso unitario suelto del agregado grueso y fino.....	41
<b>Tabla 11.</b> Peso unitario (compactado) de los agregados .....	42
<b>Tabla 12.</b> Densidad real del agregado grueso .....	43
<b>Tabla 13.</b> Densidad del agregado fino .....	44
<b>Tabla 14.</b> Resumen de resultados .....	45
<b>Tabla 15.</b> Datos de diseño para hormigón $210 \text{ Kg/cm}^2$ .....	46
<b>Tabla 16.</b> Tabla de asentamiento y coeficiente K .....	47
<b>Tabla 17.</b> Relación a/c .....	47
<b>Tabla 18.</b> Dosificación al peso, hormigón convencional $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$ .....	48
<b>Tabla 19.</b> Datos de los materiales para dosificación del hormigón $f^c=280 \text{ kg/cm}^2$ .....	49
<b>Tabla 20.</b> Tabla de asentamiento y coeficiente K .....	50
<b>Tabla 21.</b> Relación a/c.....	50
<b>Tabla 22.</b> Cantidad de materiales para hormigón $f^c= 280 \text{ Kg/cm}^2$ .....	51
<b>Tabla 23.</b> Propiedades mecánicas del hormigón fresco .....	56
<b>Tabla 24.</b> Densidad del hormigón fresco (muestras patrón) .....	57
<b>Tabla 25.</b> Densidad del hormigón fresco $f^c=210 \text{ Kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento .....	57
<b>Tabla 26.</b> Densidad del hormigón fresco $f^c=210 \text{ Kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena.....	58
<b>Tabla 27.</b> Densidad del hormigón fresco $f^c=280 \text{ Kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento .....	59
<b>Tabla 28.</b> Densidad del hormigón fresco $f^c=280 \text{ Kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento .....	60
<b>Tabla 29.</b> Densidad del hormigón endurecido (muestras patrón) .....	61

<b>Tabla 30.</b> Densidad del hormigón endurecido $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento ....	61
<b>Tabla 31.</b> Densidad del hormigón endurecido $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena .....	62
<b>Tabla 32.</b> Densidad del hormigón endurecido $f^c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento ....	63
<b>Tabla 33.</b> Densidad del hormigón endurecido $f^c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena .....	64
<b>Tabla 34.</b> Resistencia a la compresión del hormigón de muestras patrón .....	65
<b>Tabla 35.</b> Resistencia del hormigón $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento.....	65
<b>Tabla 36.</b> Resistencia del hormigón $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena.....	66
<b>Tabla 37.</b> Resistencia del hormigón $f^c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento.....	67
<b>Tabla 38.</b> Resistencia del hormigón $f^c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena.....	68

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo se realizó con el objeto de plantear una alternativa a las tecnologías utilizadas en la construcción, de tal manera que represente un aporte ambientalmente sostenible y económicamente rentable a este sector, con conocimientos sobre la reutilización de residuos sólidos, debido a que en la actualidad estos productos representan un problema grave para el ambiente y la población mundial. Con este trabajo se pudo determinar la resistencia del hormigón simple al adicionar residuos de catalizador de craqueo catalítico fluidizado, al mismo tiempo que se genere un impacto positivo al medio ambiente.

El trabajo es de carácter teórico – experimental. Teórico debido a que la investigación se basa en estudios anteriores sobre el mismo tema, con los cuales se plantearon los métodos de ensayo de los hormigones no convencionales. La parte experimental corresponde a la elaboración de probetas de hormigón no convencional para posteriormente determinar su resistencia en los laboratorios.

El trabajo experimental se realizó en su la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, con materiales que se pueden obtener únicamente en Refinería Esmeraldas.

Los resultados muestran que los cilindros de hormigón, fabricados con residuo de catalizador en un porcentaje del 10% en sustitución del cemento, adquirieron la mayor resistencia en comparación a los demás porcentaje; sin embargo no lograron alcanzar la resistencia de diseño. El presente trabajo abre el campo de investigación para futuros trabajos similares con este material.

## **B. TEXTO**

### **CAPITULO I**

#### **ANTECEDENTES**

##### **1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL**

LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO  
PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO  
CATALÍTICO FLUIDIZADO

##### **1.2 ANTECEDENTES**

Extensas investigaciones sobre el uso de aditivos minerales en mezclas de cemento Portland se han llevado a cabo en varios países. Adiciones minerales naturales y artificiales se han utilizado en la búsqueda de nuevos materiales para la construcción y también como una necesidad de resolver problemas medio ambientales. Como algunos ejemplos se pueden mencionar cenizas volantes, humo de sílice, escoria de altos hornos, escoria de acero, cobre, níquel y magnesio, cenizas volcánicas, tierra de diatomeas, opalina roca, ceniza de la cáscara de arroz, sólidos municipales, residuos de la incineración de desechos, residuos de desulfuración de gas fluido, minas y canteras y finalmente desechos y residuos de demolición, entre tantos otros.

Algunos de estos materiales son productos minerales activos que poseen actividad puzolánica o propiedades cementantes. [1]

La reutilización de subproductos industriales en la producción de hormigón ofrece muchos beneficios sobre todo en el aspecto ambiental, debido a que ocurre una disminución en la minería de extracción de recursos naturales, la prevención de problemas de disposición de desechos sólidos, el ahorro energético y la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera; beneficios económicos porque los subproductos pueden ser materiales de bajo costo y pueden ser utilizados para reemplazar los materiales tradicionales de mayor costo; y las ventajas tecnológicas, mejorando varias propiedades de los morteros fresco y endurecido y de los hormigones.

Según Payá et. Al, se conoce que durante el año de 1997 se desarrollaron las primeras investigaciones de la reutilización de catalizador agotado

proveniente de las refinerías para la industria cerámica. Los responsables de esta investigación, Pacewska et al, demostraron que los productos elaborados con catalizador agotado de craqueo catalítico en lecho fluidizado, poseían iguales características que los productos cerámicos fabricados con materiales convencionales, y además plantearon que su uso puede ser ampliado a tal punto que en la actualidad, el catalizador es mezclado con el cemento directamente en las fábricas. [1]

Las industrias de petróleo y en particular las refinerías de gasolina obtienen fracciones de peso molecular específico o seleccionado utilizando procesos de craqueo catalítico fluido (FCC). El catalizador usado frecuentemente consiste en compuestos inorgánicos de sílice, base de alúmina con estructuras atómicas muy abiertas, tipo zeolita.

La actividad catalítica de estos productos tiene un tiempo de vida corto y el catalizador viejo inactivo puede ser reemplazado por la nueva carga de catalizador activo. Así, se producen cantidades importantes de residuos de catalizador de craqueo catalítico fluidizado, causando problemas de eliminación de residuos.

De las investigaciones realizadas en varios países se ha demostrado que la composición química y la estructura atómica de catalizador agotado pueden ser apropiadas para su uso en la producción de morteros de cemento y hormigón.

Con el presente trabajo se pretende demostrar que el catalizador agotado proveniente de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de Refinería Esmeraldas, puede ser utilizado en la composición de hormigones de resistencia estructural, para de esta forma contribuir con nuevos materiales para la construcción y resolver un problema ambiental.

### **1.2.1 Investigaciones de uso del catalizador agotado como componente del hormigón**

El estudio del comportamiento mecánico del hormigón fabricado con cemento Portland, es un tema que hasta la actualidad no se ha tratado en una medida considerable, debido a las dificultades que conllevan las investigaciones, en primer lugar para obtener el catalizador agotado que es residuo de los procesos de craqueo

de la industria petroquímica, y además el costo de los ensayos que deben realizarse a los catalizadores agotados.

Hasta la fecha, se han desarrollado diversos estudios de este tipo nada más que por los grandes distribuidores a nivel mundial de Catalizadores, los cuales buscan dar una mejor disposición final a su producto una vez que éste ha culminado su tiempo útil.

En ciertos países de América Latina como Colombia y Venezuela y en Europa - regiones en las cuales existe la industria petroquímica – se han elaborado documentos técnicos, tesis maestrantes y tesis doctorales respecto al uso de catalizador agotado como adición puzolánica al cemento y al hormigón fabricado con cemento portland. A continuación se mencionan algunos de estos documentos:

Según el documento técnico “USO DEL CATALIZADOR GASTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO ADICIÓN PUZOLÁNICA - REVISIÓN” de las autoras Nancy Torres Castellanos y Janneth Torres Agredo de la Universidad Nacional de Colombia, se concluye que:

El FCC es un material puzolánico muy activo, el cual presenta alta reactividad a edades tempranas. La inclusión de este material en morteros y concretos de cemento portland, contribuye a mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos materiales.

A partir del estado actual presentado, se puede concluir que los resultados expuestos contribuirán a la conservación y preservación del medio ambiente, así como a la obtención de mejores prestaciones en morteros y concretos de cemento adicionados con este residuo.

Según el trabajo especial de grado “ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CATALIZADORES GASTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO POSIBLE REEMPLAZO DEL MATERIAL CEMENTANTE” del autor Ignacio Eduardo Milles, de la Universidad Central de Venezuela, se concluye que:



Se pudo verificar por medio de los ensayos mecánicos de laboratorio realizados en esta investigación a pastas y morteros que el catalizador agotado de la refinería de Amuay puede ser utilizado como sustituto parcial del cemento Portland en mezclas de mortero con fines estructurales. Sin embargo es apropiado realizar una mayor cantidad de ensayos para dar certificación a su aplicación.

Según el documento técnico “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE DIVERSOS RESIDUOS DE CATALIZADORES DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) EN CEMENTO PORTLAND”, de los autores J. Payá, M. V. Borrachero, J. Monzó, L. Soriano, del ICITECH - Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universidad Politécnica de Valencia, se concluye que:

De los estudios realizados a los cinco residuos de catalizador en cuanto a caracterización, reactividad puzolánica en pastas y resistencia mecánica en morteros, podemos concluir que el origen y los distintos procesos a los que han sido sometidos los catalizadores no provocan distinto comportamiento, ya que los cinco materiales estudiados presentan una reactividad puzolánica similar.

Por ello, todos los residuos de catalizador estudiados son válidos para ser utilizados como adición mineral activa en la fabricación de morteros y hormigones.

En Ecuador existen diferentes tesis de grados que estudian nuevos materiales adicionados al hormigón para obtener las mismas características mecánicas que un hormigón convencional y que aportan una disminución de residuos pasivos contaminantes al ambiente al ser combinados con los áridos, agregados, cemento y agua. Sin embargo, ninguno de ellos se refiere al uso de catalizador agotado proveniente de los procesos de cracking catalítico como parte constitutiva del hormigón. A continuación se mencionan dos trabajos referentes en alguna medida al presente.

Según el Trabajo de grado de los señores Jaigua Byron y Vázquez Santiago pertenecientes a la Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería y su publicación

“ESTUDIO DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES UTILIZANDO ÁRIDOS Y CEMENTO LOCAL, CENIZAS VOLCÁNICAS NATURALES Y SUPER-PLASTIFICANTE”, se concluye que,

La actividad que generó la adición de puzolana nos permitió reducir las cantidades de cemento portland usado en los hormigones de altas prestaciones, constituyendo una atractiva propuesta desde el punto de vista medio ambiental.

En cuanto a la resistencia del hormigón se cumplió con el objetivo, la resistencia máxima que se logró obtener fue de 503 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días con un contenido de ceniza volcánica del 20%.

Según el “ESTUDIO DEL HORMIGÓN SIMPLE ELABORADO CON LADRILLO RECICLADO Y SU INCIDENCIA EN EL PESO ESPECÍFICO Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN”, del Ingeniero Alex Dario Cáceres, de la Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, que concluye que escombros de las construcciones y residuos contaminantes pasivos pueden ser reutilizados en hormigones de baja resistencia beneficiando al ambiente de las ciudades.

Respecto a la utilización del catalizador agotado como material adicionado a la composición del hormigón fabricado con cemento portland, no se han desarrollado estudios o documentos técnicos por parte de alguna universidad pública o particular o por instituciones estatales.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El crecimiento acelerado de la población en el país ha dinamizado la oferta y la demanda de la vivienda, especialmente en las grandes y medianas ciudades. Según datos entregados por el sector inmobiliario al Diario El Comercio en su portal web, se conoce que se ha producido un déficit habitacional estimado de entre 400 000 y 700 000 unidades habitacionales, puesto que no existe la suficiente cantidad de viviendas para la población demandante. Unos 40 000 hogares acceden a vivienda nueva cada año.

Según datos proporcionados por la Revista digital “Líderes” se menciona que en nuestro país durante el último año, la economía no petrolera sostuvo el 90% del crecimiento del PIB. Y el sector de la construcción, fue el principal aportante. El sitio web explica que si bien durante el 2012 la construcción registró un alza del 8,6%, menor a las tasas de hasta el 21,6% de años atrás, eso se debió a que "es imposible sostener tasas tan elevadas por mucho tiempo. Pero igual es muy importante los registros que se han obtenido".

Considerando estas situaciones, se asegura que la demanda de construcciones y obras civiles en el país es creciente y que por tal motivo es necesario incrementar proyectos que contribuyan al aseguramiento de la vivienda, y sobre todo que se asegure la permanente producción de materia prima de los productos tradicionales utilizados en construcción. Es necesario aportar también a la preservación del ambiente, pues se conoce que la fabricación de materiales como el cemento, la extracción de áridos de ríos y canteras y la fabricación de aditivos generan un grave impacto negativo al ecosistema y por ello, se deben buscar nuevos y modernos materiales que reduzcan estas emisiones y generen compuestos sostenibles.

Como manifiesta Daza (2010) en su tesis *Construcción sostenible de edificios: Una alternativa responsable para el desarrollo urbano de Quito*,

En países de Latinoamérica, como el Ecuador, apenas sea incursionado en prácticas sostenibles en la construcción de edificios debido a la falta de desarrollo industrial, personal técnico, apoyo del sector público y privado, y otras barreras comunes en el país por las cuales se siguen construyendo edificios con materiales convencionales y generando grandes impactos ambientales.

Tomando en consideración estos argumentos, el presente trabajo experimental busca aportar al desarrollo de materiales alternativos para la construcción y con ello reemplazar ciertos materiales tradicionales que provocan fuertes impactos al ambiente, o por lo menos disminuir su uso. Asimismo, mediante este estudio se planteará dar una solución ambiental a los pasivos ambientales producto de los procesos químicos de craqueo catalítico de Refinería Esmeraldas que actualmente se

encuentran colocados en pozos bajo el suelo en una cantidad aproximada de 5000 toneladas y que día a día esta cantidad se ve incrementada.

La innovación con productos nuevos para la construcción, así como la reutilización de pasivos ambientales como el catalizador agotado de craqueo catalítico, justifican el presente trabajo experimental. Durante el desarrollo del mismo se podrá observar que mediante esta investigación se pueden resolver dos problemas que actualmente tienen impacto en las construcciones ecuatorianas y en el medio ambiente.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

Determinar la resistencia a la compresión del hormigón fabricado a base de cemento Portland al combinarlo con catalizador agotado, pasivo ambiental sólido extraído de craqueo catalítico fluidizado, como posible reemplazo del cemento y de la arena.

### **1.4.2 Específicos**

- Evaluar las características físicas y químicas de la muestra del catalizador agotado obtenido de craqueo catalítico.
- Analizar la resistencia a la compresión de las muestras de hormigón a la edad de veinte y ocho días.
- Plantear tablas y gráficas correspondientes a los resultados obtenidos.
- Interpretar los resultados obtenidos entre la muestra patrón y las probetas experimentales con catalizador.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1 DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN SIMPLE

Algunos autores definen al hormigón como “una piedra artificial formada al mezclar apropiadamente cuatro componentes básicos: cemento, arena, grava y agua”. [2]. En general, al hormigón se lo puede considerar como un tipo de piedra elaborado de tal forma que posea características semejantes a una piedra natural pero con ventajas muy superiores a éstas por su facilidad de adaptación a cualquier forma y dimensiones.

Está formado por una pasta y un material de relleno.

AIRE 2% - 3%	SÓLIDOS
<b>PASTA</b>	<b>RELLENO</b>
CEMENTO + AGUA	AGREGADOS FINO Y GRUESO
MATERIAL ACTIVO	MATERIAL MUERTO
APROX. 25%	APROX. 75%

*Tabla 1. Adaptación del folleto de Ensayo de Materiales II*

*Fuente: Folleto de Ensayo de Materiales II, Ing. Medina Santiago*

Las propiedades del hormigón dependen en gran medida de la calidad y proporciones de los componentes en la mezcla, y de las condiciones de humedad y temperatura, durante los procesos de fabricación y de fraguado.

Para conseguir propiedades especiales del hormigón o para mejorarlas, como la trabajabilidad, mayor resistencia, baja densidad, entre otras, se pueden añadir otros componentes como aditivos químicos, micro sílice, limallas de hierro, o se pueden reemplazar sus componentes básicos por componentes con características especiales como agregados livianos, agregados pesados, cementos de fraguado lento. [2]

#### 2.2.1 Componentes del Hormigón

##### 2.2.1.1 Cemento

El cemento es un ligante hidráulico, es decir, que mezclado con el agua tiene la propiedad de endurecerse ya sea al aire libre o bajo el agua.

Para fabricar hormigón estructural se utilizan únicamente los cementos hidráulicos, que son aquellos que utilizan agua para reaccionar químicamente y adquirir sus propiedades cementantes durante los procesos de endurecimiento inicial y fraguado. Entre los diferentes cementos hidráulicos destaca, por su uso extendido, el cemento Portland, existiendo además los cementos naturales y los cementos con alto contenido de alúmina.

De acuerdo al Código ACI-318-08, en la sección que se refiere a materiales cementantes se establece que para constituir el concreto estructural, estos materiales deben cumplir con las normas ASTM, de acuerdo a la siguiente descripción:

- a) Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto: ASTM C618
- b) Cementos hidráulicos adicionados: ASTM C595, se excluyen los tipos IS ( $\geq 70$ ) ya que no pueden ser empleados como constituyentes cementantes principales en el concreto estructural.
- c) Cemento hidráulico expansivo: ASTM C845
- d) Cemento hidráulico: ASTM C1157
- e) Ceniza volante y puzolana natural: ASTM C618
- f) Escoria granulada molida de alto horno: ASTM C989
- g) Humo de sílice: ASTM C1240

### **2.2.1.2 Tipos de cemento Portland**

Las normas INEN 152 establecen cinco tipos de cemento Portland.

*Tipo I:* Cemento portland de uso general. Se lo utiliza en hormigones normales que no están expuestos a agentes agresivos del ambiente como sulfatos tanto en el suelo como en el agua.

Los más utilizados en Ecuador son el IP y el IE. [3]

TIPO DE CEMENTO	CARACTERÍSTICAS
TIPO IA	Tipo I más aditivo incorporador de aire
TIPO IE	Se incluye hasta un 20% de puzolana en el momento de moler el Clinker. Generan menor calor de hidratación. Son más resistentes a las aguas con sulfatos.
TIPO IP	Se incluyen entre 20 y 40% de puzolana al momento de moler el Clinker, para que reacciones con cal y colabore en la resistencia.

*Tabla 2. Sub tipos de cementos tipo I*

*Fuente: Folleto Ensayo de Materiales I, Ingeniería Civil - UTA*

*Tipo II:* Producen moderado calor de hidratación y moderada resistencia a sulfatos. Son útiles para estructuras en contacto con el agua como piscinas o cisternas.

Tipo IIA: Tipo II más aditivo incorporador de aire.

*Tipo III:* De alta resistencia inicial pero producen mayor calor de hidratación. Son cementos de fraguado rápido y se utilizan para estructuras que se encuentran en contacto con el agua durante su proceso de construcción.

Tipo IIIA: Tipo III más aditivo incorporador de aire.

*Tipo IV:* De bajo calor de hidratación. Son cementos de fraguado lento. Se pueden utilizar en estructuras como represas en las cuales se requiere controlar el calor emitido durante el proceso de fraguado.

*Tipo V:* Este tipo de cemento es resistente a los sulfatos que pueden estar presentes en el medio o en el mismo hormigón. [3]

### **2.2.1.3 Características físicas y mecánicas del cemento**

Entre las características físicas y químicas del cemento se encuentran la finura de molido, el peso específico real y el fraguado.

*Finura de molido.-* Esta característica está íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, pues influye en la velocidad de las reacciones químicas durante el proceso de fraguado.

Los granos de cemento se hidratan únicamente hasta una profundidad de 0,01 mm, por lo que si son demasiado gruesos quedará un núcleo inerte, disminuyendo de esta forma su rendimiento. Si son demasiado finos su retracción y calor de hidratación aumentan, resultando perjudicial. Debe existir un equilibrio en la finura de molido del cemento para conservar adecuadas resistencias mecánicas.

La finura del cemento se mide por sus residuos en dos tamices tipo, de 900 y 4900 mallas por centímetro cuadrado. [3]

*Peso específico real.*- Varía muy poco entre cementos de diferente tipo y oscila alrededor de 3,0 g/cm<sup>2</sup>.

*Fraguado.*- Se refiere a la pasta de cemento que se forma al mezclar el cemento con agua, y que tiene la propiedad de endurecerse a medida que transcurre el tiempo. Inicia aproximadamente a las dos horas de haber añadido el agua hasta que la mezcla empieza a perder trabajabilidad y gana resistencia. El fraguado final se determina cuando la mezcla ha perdido su trabajabilidad y se ha endurecido completamente, de tal forma que si se le añade más agua, ésta no afectará en forma alguna sus propiedades.

De acuerdo a la norma NTE INEN 2380, los requerimientos físicos normalizados para los diferentes tipos de cemento utilizados en el país son las siguientes:

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Finura	INEN 196	A	A	A	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	INEN 200	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tiempo de fraguado, método de Vicat <sup>A</sup>	INEN 158						
Inicial, no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45
Inicial, no más de, minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	C	C	C	C	C	C
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo <sup>D</sup>	INEN 488						
1 día		--	12	--	--	--	--
3 días		13	24	11	11	5	--
7 días		20	--	18	18	11	11
28 días		28	--	--	25	--	21
Calor de hidratación	INEN 199						
7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		--	--	--	--	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		--	--	--	--	--	290 (70)
Expansión en barra de mortero	INEN 2 529						
14 días, % máximo		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos) <sup>E</sup>	INEN 2 503						
6 meses, % máximo		--	--	0,10	0,05	--	--
1 año, % máximo		--	--	--	0,10	--	--

<sup>A</sup> El porcentaje retenido en el tamiz de 45 µm (No. 325) por vía húmeda y el área de la superficie específica determinada en el equipo de permeabilidad al aire en m<sup>2</sup>/kg, ambos deben ser informados en todos los certificados de resultados requeridos al fabricante.

<sup>B</sup> El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTE INEN 158.

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

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

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

**Tabla 3. Requisitos físicos normalizados del cemento**

**Fuente:** Norma NTE INEN 2380.



#### 2.2.1.4 Composición química del cemento Portland

El cemento Portland es un alúmino silicato de calcio semejante a una piedra. Se obtiene por calentamiento incipiente de aproximadamente 1300 °C, de una mezcla de minerales finamente molidos, formados por piedra caliza y arcilla. El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3m de diámetro y 100 m de largo.

El material obtenido de los hornos se denomina Clinker, el cual se muele finamente adicionándole de un 2% a 3% de yeso para evitar que fragüe instantáneamente.

Químicamente este nuevo material se encuentra formado de la siguiente manera:

NOMBRE	FÓRMULA	FÓRMULA DE ÓXIDOS	PORCENTAJE
Silicato dicálcico	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4$	$\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$	32%
Silicato Tricálcico	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5$	$\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO}$	40%
Aluminato tricálcico	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$	10%
Ferroaluminato tetra cálcico	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{CaO}$	9%
Sulfato de calcio	$\text{CaSO}_4$		2 – 3%

*Tabla 4. Composición química del cemento Portland*

*Fuente: Tabla tomada de [www.elconstructorcivil.com](http://www.elconstructorcivil.com)*

#### 2.2.1.5 Fraguado del cemento

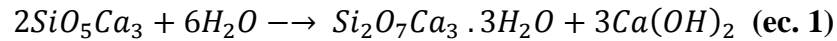
Se denomina fraguado al proceso químico por el cual el cemento adquiere dureza pétreo irreversible, en un proceso hidráulico, debido a que por acción del agua se produce el fenómeno de hidrólisis de algunos compuestos y posteriores hidrataciones y recombinaciones. Este proceso de endurecimiento es una reacción química exotérmica y para el efecto requiere de agua, siendo mucho más intensa la reacción en las primeras horas y días posteriores a la fabricación del hormigón, y luego va disminuyendo progresivamente en su intensidad con el tiempo.

El fraguado se produce en dos etapas:

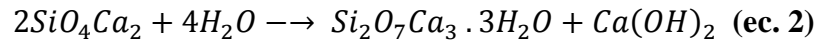
- Fraguado.- Proceso que dura de minutos a 15 horas, en que la masa plástica adquiere rigidez.

- Endurecimiento.- Proceso en que la masa rígida aumenta su dureza y resistencia mecánica que demanda de 28 días a varios años. [4]

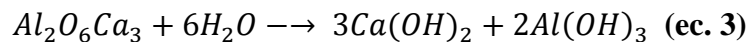
Las reacciones en que suceden en esta etapa son complejas, pero de manera simplificada se pueden considerar así:



(Silicato tricálcico + agua  $\rightarrow$  gel de tobermorita + hidróxido de calcio)



(Silicato dicálcico + agua  $\rightarrow$  gel de tobermorita + hidróxido de calcio)



(Aluminato tricálcico + agua  $\rightarrow$  hidróxido de calcio + hidrato de Aluminio)

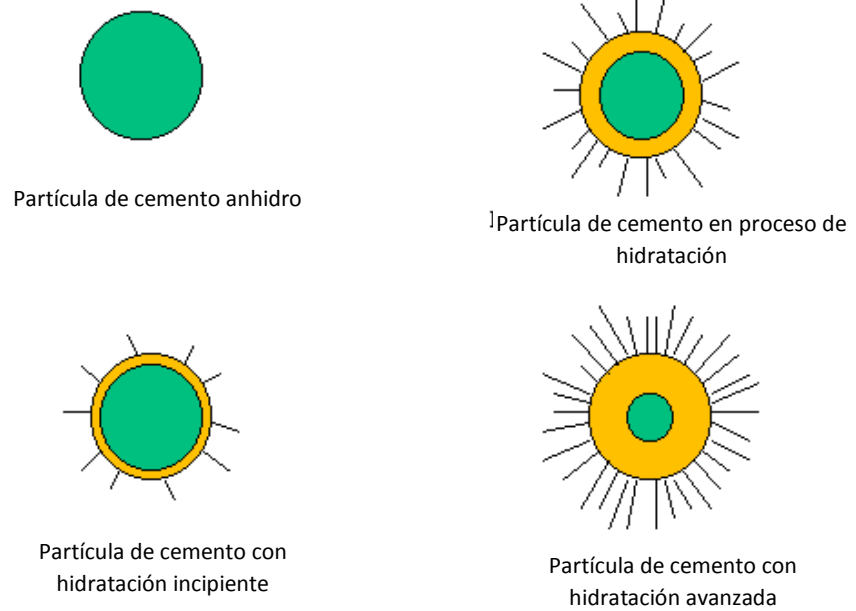
*Ecuación 1. Reacciones químicas durante la etapa de fraguado [5]*

*Fuente: Hidratación del cemento, Apuntes de ingeniería civil [online]*

De esta manera, las consecuencias de los procesos de hidratación son:

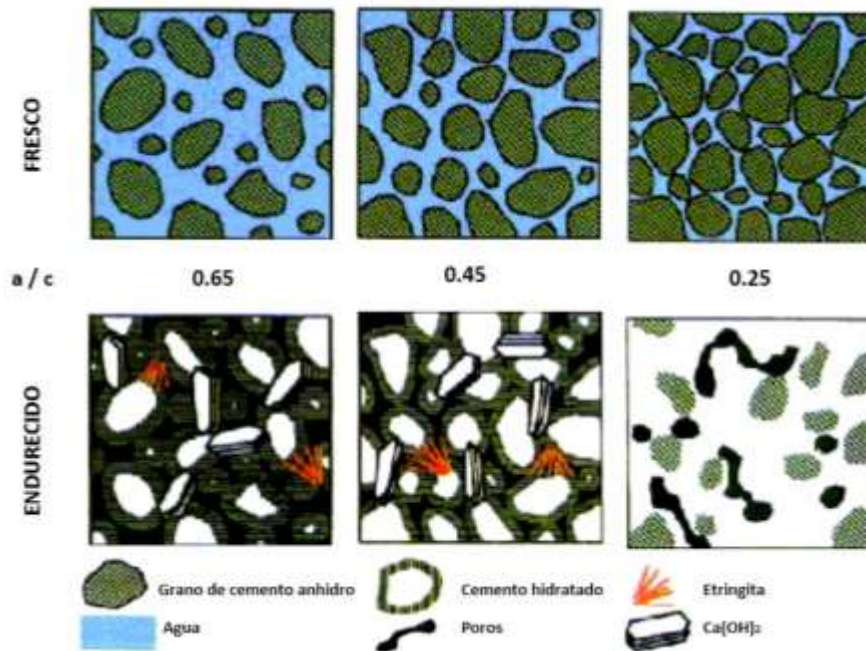
- Solidificación (combinación) del agua.
- Generación de nuevas fases (hidratos).
- Aumento del volumen total de fases sólidas.
- Desprendimiento de calor. [6]

A continuación se indican dos figuras. En la primera se indica el proceso de hidratación de una partícula de cemento durante el transcurso del tiempo hasta alcanzar los 28 días de edad. En la segunda figura se muestra la estructura interna del hormigón respecto a la relación agua/cemento (a/c). En esta imagen se puede observar que mientras menor es la a/c, mayor será la resistencia del hormigón debido al bajo volumen de poros, y como consecuencia el contenido de “lentos” incrementa la resistencia del elemento. Adicionalmente, en la figura se observa que los hormigones de alta relación a/c tienen alta porosidad y, consecuentemente, alta permeabilidad y espacio para la formación de grandes cristales de  $(OH)_2Ca$  (cal) y etringita, por lo cual se verá afectada la durabilidad debido a que sustancias agresivas pueden ingresar al hormigón con cierta facilidad disueltas en agua o el aire. [7]



**Figura 1.** Progreso de la hidratación de una partícula de cemento

Fuente: Ing. Edgardo A. Becker, ARCcon.com [online]



**Figura 2.** Estructura interna del hormigón fresco y endurecido

Fuente: Ing. Edgardo A. Becker, ARCcon.com [online]

### 2.2.2 Áridos

El término áridos se utiliza para definir al material pétreo que se utiliza en el hormigón, independientemente de su tamaño. [3]

En hormigones estructurales, los áridos o agregados ocupan alrededor de las tres cuartas partes del volumen total del hormigón, mientras que el volumen restante está constituido por pasta endurecida de cemento, agua sin combinar y burbujas de aire.

Mientras mayor sea el nivel de compactación del hormigón, mejor será su resistencia y más económica será su fabricación; por esta razón es necesario mantener la granulometría adecuada de los agregados, es decir cuidar el tamaño de los granos y la distribución estadística de esos tamaños de grano.

También es importante que las características mecánicas de los áridos sean adecuadas y que estén, en lo posible, libres de impurezas. [2]

El código ACI-318-14 establece las siguientes normativas para los áridos:

- a) Agregado de peso normal: ASTM C33
- b) Agregado liviano: ASTM C330.

El tamaño máximo nominal del agregado grueso no debe ser superior a:

- a)  $1/5$  de la menor separación entre los lados del encofrado, ni a
- b)  $1/3$  de la altura de la losa, ni a
- c)  $3/4$  del espaciamiento mínimo libre entre las barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de tendones, tendones individuales, paquetes de tendones o ductos. [8]

Para los agregados finos se recomienda un módulo de finura próximo a 3.

#### **2.2.2.1 Arena**

Se denomina arena a la fracción menor a 5mm o a los agregados que pasan por el tamiz No. 4. La arena es el árido de mayor responsabilidad, ya que dependiendo de sus características se puede obtener un hormigón de buena o mala calidad.

El principal componente de la arena es la sílice o dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), y su origen es muy variado, las mejores arenas son las de río, salvo en algunas excepciones, estas arenas son de cuarzo puro. Las arenas de mina suelen tener arcilla en exceso, por lo cual deben lavarse. Son también excelentes las arenas que provienen de la trituración de granitos, basaltos y rocas similares. [3]

#### **Propiedades mecánicas de la arena: Análisis granulométrico**

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación de materiales con el propósito de utilizarlos como áridos para hormigón o utilizarlos como áridos para otros propósitos. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar la información necesaria para el control de la producción de diversos productos de áridos y mezclas que contengan áridos. La información también puede ser útil en el desarrollo de relaciones para estimar la porosidad y el arreglo de las partículas. [9]

Las partículas componentes de una muestra en condiciones secas y de masa conocida son separadas por tamaño a través de una serie de tamices de aberturas ordenadas en forma descendente. Las masas de las partículas mayores a las aberturas de la serie de tamices utilizados, expresado en porcentaje de la masa total, permite determinar la distribución del tamaño de partículas. [9]

Para determinar la granulometría de los áridos finos o arena se utiliza la serie de tamices de Tyler, o los especificados en la norma ASTM E11 o INEN 152.

<b>Tamiz #</b>	200	100	50	30	16	8	4
<b>Abertura en mm</b>	0,075	0,149	0,297	0,59	1,18	2,36	4,75

*Tabla 5. Tamices de la serie de Tyler para áridos finos*

*Fuente: Folleto Ensayo de Materiales I, Ingeniería Civil - UTA*

Una vez realizado el ensayo de granulometría se procede a graficar la curva granulométrica, la cual expresa los porcentajes que atraviesan los tamices versus la abertura de cada tamiz. Mediante esta curva se puede identificar si se posee una buena distribución de partículas y sobre todo si éstas se encuentran dentro de los rangos permitidos por las normas y si se asegura su continuidad.

De un buen árido y una correcta distribución de sus partículas dependerá la calidad del hormigón.

### **Módulo de finura**

El módulo de finura es el valor correspondiente a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices #100, #50, #30, #16, #8, #4.

Es recomendable que el módulo de finura de la arena se encuentre entre 2.3 y 3.1. Si el módulo de finura disminuye, el material es más fino y por lo tanto la superficie específica aumenta y viceversa. [3]

### **Densidad**

La densidad depende de la gravedad específica de los constituyentes sólidos como de la porosidad del material mismo. La densidad de los agregados es especialmente importante para los casos en que se busca diseñar concretos de bajo o alto peso unitario.

Las bajas densidades indican también que el material es poroso y débil y también de alta absorción. [3]

### **Porosidad**

La palabra porosidad viene de poro que significa espacio no ocupado por materia sólida. En la partícula de agregado es una de las propiedades más importantes del agregado por su influencia en comportamiento de las demás características de éste. Puede influir en la estabilidad química, resistencia a la abrasión, resistencias mecánicas, propiedades elásticas, gravedad específica, absorción y permeabilidad. [3]

### **Peso Unitario**

Es el resultado de dividir el peso de las partículas entre el volumen total incluyendo los vacíos. Al incluir los espacios entre partículas influye la forma de acomodo de estos. El procedimiento para su determinación se encuentra normalizado en ASTM C 29. El peso unitario representa un valor útil sobre todo para hacer las transformaciones de pesos a volúmenes y viceversa. [3]

### **Porcentaje de Vacíos**

Es la medida de volumen expresado en porcentaje de los espacios entre las partículas de agregados, depende del acomodo de las partículas por lo que su valor es relativo como en el caso del peso unitario. [3]

### **2.2.2.2 Grava o ripio**

Se denomina así a la fracción mayor de 5mm o que no atraviesa el tamiz No. 4. Su resistencia está ligada a su dureza, densidad, y módulo de elasticidad. Una grava de calidad tiene una densidad real mayor a 2.6 g/cc y una resistencia a la compresión mayor a 1000 kg/cm<sup>2</sup>. Menores a ésta densidad y resistencia, son gravas no admisibles para conformar un hormigón de buena calidad. [3]

### **2.2.3 Agua**

Casi cualquier agua natural, sea esta potable y que no tiene un olor ni sabor marcado, puede utilizarse como agua de mezclado en la elaboración de concreto. Las impurezas excesivas en el agua de mezclado, pueden afectar no solo el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto y la estabilidad volumétrica (variación dimensional), sino que también pueden provocar eflorescencia o corrosión en el refuerzo. Siempre que sea posible debe evitarse agua con gran concentración de sólidos disueltos.

El agua empleada en el mezclado de concreto debe cumplir con las disposiciones de la norma ASTM C1602M. [8]

### **2.2.4 Aditivos**

Existen aditivos químicos que, en proporciones adecuadas, cambian o mejoran las características del hormigón fresco, del hormigón endurecido y del proceso de fraguado. Entre estos tipos de materiales se encuentran aditivos de procedencias químicas como plastificantes, súper plastificantes, acelerantes, retardantes, introductores de aire entre otros tantos, cada uno de ellos con un uso específico para el tipo de obra que se requiera construir.

Además, existen sustancias especiales, como la ceniza volcánica pulverizada (fly ash) o la cáscara de arroz quemada y pulverizada, que por su composición química apropiada y por su granulometría aún más pequeña que la del cemento, mejoran la resistencia del hormigón a largo plazo. [2]

## **Puzolanas**

En la norma ASTM C 125 se define a la puzolana como un material silíceo o silico-aluminoso que en sí posee poco o ningún valor cementante, pero que en forma finamente dividida y en presencia de humedad reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para formar compuestos con propiedades cementantes. Ciertas cenizas volantes, vidrios volcánicos, tierras diatomáceas y algunos esquistos o arcillas, ya sea que estén tratados con calor, o crudos, son ejemplos de materiales puzolánicos. [10]

### **Materiales puzolánicos y cementantes**

Ciertas cenizas volantes (normalmente producidas por la combustión de carbón sub-bituminoso o lignita) tienen características cementantes limitadas, pero también se combinan con la cal al igual que las puzolanas.

### **Otros aditivos minerales finamente divididos**

Los aditivos minerales que no son ni cementantes ni puzolánicos, se han considerado hace poco como relativamente inertes cuando se les agrega a mezclas de agua/cemento. Entre estos aditivos se incluyen las arenas de cuarzo y las silíceas finamente divididas, piedras de cal y calizas calcíicas y dolomíticas, granito y otros polvos de roca, desperdicios de crisotilo (asbesto), cal dolomítica hidratada o con elevado contenido de calcio, así como otros materiales. Algunos materiales que se presentan de manera natural requieren calcinación para desarrollar actividad puzolánica útil. Estos materiales frecuentemente se utilizan como aditivos en estado crudo, en aplicaciones en las que no se logra o no se espera actividad puzolánica. [10]

## **2.2.5 Propiedades mecánicas del hormigón**

### **2.2.5.1 Propiedades mecánicas del hormigón fresco**

Se denomina hormigón fresco al resultado que obtenemos de mezclar el cemento, los áridos y el agua, desde el momento de su amasado hasta que fragua el cemento.

Sus propiedades son la trabajabilidad, la consistencia, la homogeneidad y el peso específico.



La trabajabilidad se refiere a la facilidad que tiene el hormigón para ser amasado, manipulado y puesto en obra, con los medios de compactación que se disponga. Depende de diferentes condiciones como la cantidad de agua, el contenido de áridos finos y la forma de los áridos gruesos (los cantos rodados mejoran la trabajabilidad). [3]

La consistencia se refiere a la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse o adaptarse a una forma específica. Para determinar esta propiedad se realiza el ensayo del Cono de Abrams según las normas INEN 1578 y ASTM C 143.

La homogeneidad es una cualidad en la que los diferentes componentes del hormigón aparecen uniformemente distribuidos en toda la masa. Esto se consigue con un buen amasado. [3]

El peso específico es un índice de la uniformidad del hormigón durante la ejecución de una obra.

#### **2.2.5.2 Propiedades del hormigón endurecido**

Para el diseño de estructuras de hormigón simple u hormigón armado, de hormigón pre-esforzado o de hormigón con perfiles laminados en caliente de acero, de hormigón con perfiles soldados de acero o para cualquier forma de combinación del hormigón con algún material, se utilizan las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. Las propiedades del hormigón endurecido dependen de la dosificación inicial de los componentes básicos y complementarios, del proceso de mezclado, y del proceso de curado.

Entre las más importantes se tiene:

- a) Resistencia a la Compresión
- b) Módulo de Elasticidad
- c) Ductilidad
- d) Resistencia a la Tracción
- e) Resistencia al Corte
- a) Resistencia a la Compresión**

La resistencia a la compresión del hormigón ( $f_c$ ) se determina en muestras cilíndricas estandarizadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura según

normas INEN 1855 y ASTM C172, llevadas hasta la rotura mediante cargas incrementales relativamente rápidas, que duran unos pocos minutos. [2]

Tiempo (días)	Resistencia a la compresión (%)
1	16
3	40
7	65
14	90
28	99

**Tabla 6.** Resistencia a la compresión a diferentes edades  
**Fuente:** Folleto Ensayo de Materiales I, Ingeniería Civil - UTA

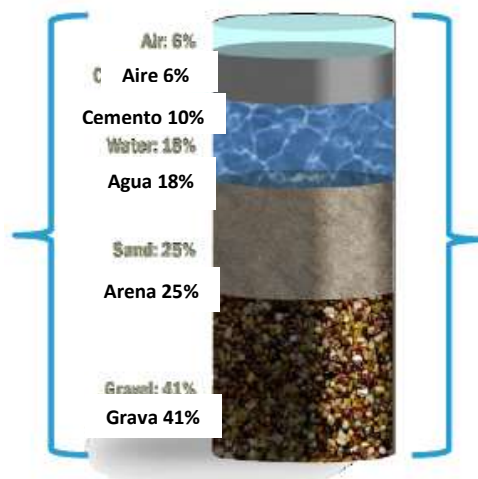
Esta resistencia se la mide luego de 28 días de fraguado bajo condiciones controladas de humedad. Durante el periodo de 28 días los cilindros suelen mantenerse sumergidos en agua o en un local con temperatura constante y humedad de 100%.

La resistencia a la compresión del hormigón debe ser tal que, si se ensayan varias muestras en el laboratorio, el 95% de las probetas deben tener resistencias mayores a la resistencia para la cual se hizo la dosificación o iguales entre sí. [3]

- **Resistencia a la compresión del hormigón mezclado con catalizador**

De acuerdo a varios estudios mencionados durante el desarrollo de este capítulo, se ha demostrado que la resistencia a la compresión del hormigón al cual se le ha adicionado catalizador agotado proveniente del craqueo catalítico fluidizado, se conserva igual a la resistencia de un hormigón elaborado en materiales convencionales. [11]

Entre estos estudios se destacan los siguientes datos, y además se muestra una imagen de los porcentajes en que intervienen los componentes tradicionales en un hormigón endurecido:



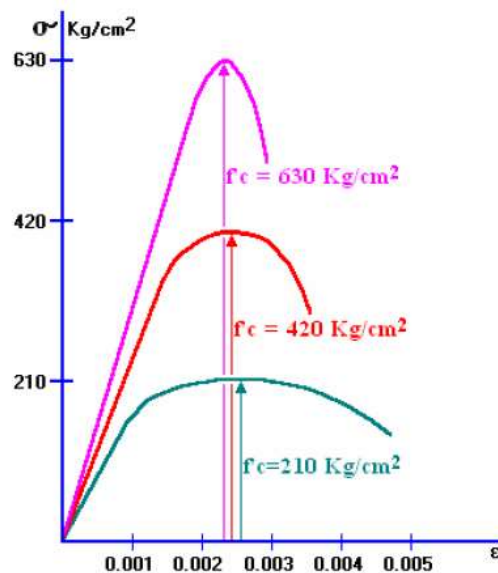
**Figura 3.** Composición de un hormigón endurecido

*Fuente: Spent Catalyst Recycle in Concrete, BASF (Confidential)*

- *Catalizador como sustitución del cemento.*- Se puede sustituir entre 0 - 15% de cemento. Más del 20% de la resistencia a la compresión se incrementa en los 7 primeros días hasta los 28 días, mientras que el hormigón mantiene una baja relación agua / aglomerante. [11]
- *Sustitución de la arena.*- Se puede sustituir entre 5 - 15% de arena permitiendo un incremento de fuerza compresiva en los primeros días de fraguado.
- *Sustitución con cenizas volantes en el cemento.*- Con el 70% de cemento, 20% de cenizas volantes, 10% de catalizador de FCC, se reduce la cantidad de cemento utilizado.
- *Mayor resistencia a la compresión que mezclas de cemento – ceniza volante o solamente de cemento.*- Aumento significativo de la resistencia durante los 7 días iniciales, 28 días y 90 días. Resistencia incrementada entre el 10 al 25%. [11]

#### **b) Módulo de elasticidad**

Cuando se dibujan las curvas Esfuerzo-Deformación ( $\epsilon - \tau$ ) de las muestras cilíndricas de hormigón, sometidas a compresión bajo el estándar ASTM C 469 - 94, se obtienen diferentes tipos de gráficos que dependen fundamentalmente de la resistencia a la rotura del material, como se muestra en el siguiente ejemplo. [2]



**Figura 4.** Ejemplo de la determinación del Módulo de elasticidad de diferentes muestras de hormigón endurecido

**Fuente:** Temas de Hormigón armado – Capítulo I, Marcelo Romo (2009)

Los hormigones de menor resistencia suelen mostrar una mayor capacidad de deformación que los hormigones más resistentes.

La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de Elasticidad del material o Módulo de Young, que se simboliza “Ec”.

El Módulo de Elasticidad se calcular puede mediante la siguiente expresión.

[2]

$$E_c = \frac{\sigma_{c,1}}{\varepsilon_{c,1}}$$

**Ecuación 2.** Cálculo del Módulo de Elasticidad

**Fuente:** Temas de Hormigón armado – Capítulo I, Marcelo Romo (2009)

Donde:

$\sigma_{c,1}$  = es el esfuerzo ejercido sobre el área de sección transversal del material.

$\varepsilon_{c,1}$  = es la deformación unitaria en cualquier punto del material.

De acuerdo al Código ACI (American Concrete Institute) se propone la siguiente expresión que sirve para determinar el módulo de Elasticidad cuando la resistencia del hormigón es mayor.

$$E_c = 15000\sqrt{f'_c}$$

*Ecuación 3. Módulo de elasticidad*

*Fuente: Código ACI*

Donde:

$E_c$  = Módulo de elasticidad del hormigón medido en Kg/cm<sup>2</sup>.

$f'_c$  = Resistencia a la compresión del hormigón medida en Kg/cm<sup>2</sup>.

La expresión previa es adecuada para hormigones con agregados de peso normal y resistencias normales y medias.

### **c) Ductilidad**

El índice de ductilidad por deformación es un excelente referente de la capacidad del hormigón para deformarse por encima de su límite de fluencia.

El índice de ductilidad por energía de deformación se emplea como referente de la capacidad del hormigón para disipar energía cuando incursiona dentro del rango de comportamiento inelástico, particularmente bajo solicitaciones estructurales por encima del rango normal y eventual de trabajo, como en el caso de sismos de baja probabilidad de ocurrencia que superan ampliamente al sismo de diseño.

Uno de los requisitos más importantes que debe reunir un hormigón en zonas sísmicas es su ductilidad, lo que en nuestro medio limita la utilización de hormigones de resistencia media  $f_m$  superior a 500 Kg/cm<sup>2</sup>, por ser sumamente frágiles (tienen una rotura muy rápida y explosiva). [2]

### **d) Resistencia a la tracción**

El hormigón es un material ineficiente resistiendo cargas de tracción; comparativamente esta resistencia representa aproximadamente el 8 a 15% de su capacidad a la compresión. Es por ello que en el hormigón armado los esfuerzos de tracción son absorbidos por el acero de refuerzo. La resistencia a la tensión del concreto varía de su resistencia a la compresión. [2]

Una razón principal para esta baja resistencia, es que el concreto contiene un gran número de grietas muy finas. Las grietas tienen poca importancia cuando

el concreto está sometido a cargas de compresión, porque éstas ocasionan que las grietas se cierren y permitan entonces la transmisión de la compresión. Obviamente, éste no es el caso para cargas de tensión. [12]

Para determinar esta propiedad en el hormigón se han desarrollado dos tipos de ensayos, la prueba del módulo de ruptura y la prueba radial de cilindro.

La primera prueba se realiza en base a la norma ASTM C78-2002, y consiste en aplicar cargas axiales en los tercios del claro de una viga rectangular de hormigón simple de 15 cm x 15 cm x 75 cm, con apoyos simples a 60 cm entre centros. La prueba termina cuando se produce la falla por agrietamiento en la cara de tensión de la viga. Mediante este ensayo se determina el módulo de ruptura, sin embargo esta prueba no es muy exacta debido a las suposiciones de cálculo que deben realizarse.

En la prueba radial de cilindro se utilizan cilindros tradicionales de hormigón colocados horizontalmente. A lo largo del cilindro, tanto en su parte superior como en su parte inferior se colocan placas metálicas para la aplicación de carga de compresión uniformemente lineal y transversal. La falla del cilindro se produce por separación, sobre un eje vertical, de las dos mitades de la muestra. [12]

#### **e) Resistencia al corte**

Es particularmente complicado obtener en pruebas de laboratorio, fallas por cortante puro que no estén afectadas por otros esfuerzos. Por tal motivo, mediante varias pruebas para resistencia por cortante del concreto a lo largo de los años, se han obtenido valores que varían entre un tercio y cuatro quintos de las resistencias últimas a la compresión. [12]

#### **2.2.6 Catalizador agotado**

El craqueo catalítico es un proceso fundamental de la industria petroquímica cuyo objetivo es la modificación de la estructura molecular de ciertos hidrocarburos para obtener combustibles de calidad extra para automotores y otros productos más finos a partir de naftas seleccionadas.

Para llevar a cabo este proceso de craqueo es fundamental un conjunto de tierras raras llamado catalizador. El catalizador es un material fino conformado por una zeolita tipo Y, la cual es un aluminosilicato cristalino y micro poroso constituido por tetraedros de  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  y  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ . Durante el proceso de ruptura catalítica, este catalizador experimenta tratamientos rigurosos en el regenerador que modifica su comportamiento, formando así un material amorfo con su consecuente pérdida de actividad para el proceso de craqueo, convirtiéndose de esta manera en un pasivo ambiental de las refinerías. [13]

Durante el uso de estos catalizadores en las unidades de craqueo, parte de ellos llamados catalizadores de equilibrio son retirados por tener baja actividad y sustituidos por nuevos catalizadores; y otra parte llamados catalizadores de precipitadores electrostático porque se recogen en unidades que llevan el mismo nombre. Los catalizadores de equilibrio son los productos desechados y almacenados en sitios libres de humedad para su reposo. [14]

Los estudios realizados sobre materiales fabricados con este subproducto han revelado que no son peligrosos, pues cumplen con los requisitos medioambientales exigidos [13].

### **2.2.7 Estructura del Catalizador**

Generalmente, los catalizadores de craqueo catalítico están formados por partículas esféricas. Los componentes contenidos en los catalizadores de craqueo catalítico son la zeolita, arcilla, matriz y aglutinante. Cada componente mejora uno o más aspectos del comportamiento del catalizador.

La zeolita es el componente catalítico primario para el craqueo selectivo, proporciona alta actividad al catalizador, alta selectividad a la producción de gasolina y mejora la selectividad al coque.

La matriz es usada en el catalizador de craqueo fluidizado principalmente como un medio para craquear los componentes pesados provenientes en la alimentación a la unidad (altos puntos de ebullición) debido a sus grandes poros, a diferencia de las pequeñas aberturas de poro que presenta la zeolita.

La arcilla es un componente importante que sirve como un receptor y medio de transferencia de calor, así como para contrarrestar el efecto contaminante del sodio presente en la alimentación. La arcilla proporciona poca o ninguna actividad al catalizador, pero le da la fuerza mecánica y la densidad a la partícula para lograr sus óptimas propiedades de fluidización.

El aglutinante es la sustancia que mantiene unidos todos los componentes del catalizador. Algunos aglutinantes, como los polímeros de alúmina y los sistemas basados en arcilla, presentan cierta actividad al craqueo catalítico por lo que son añadidos para el craqueo de fondos. Todos los componentes proporcionan la capacidad calórica para la transferencia de calor entre el reactor y el regenerador. [13]

### **2.2.8 Descripción general del proceso de craqueo catalítico**

El proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado CCF (FCC por sus siglas en inglés) emplea un catalizador de partículas muy finas las cuales se comportan como un fluido cuando son aireadas con hidrocarburos, vapor y aire. El catalizador fluidizado circula continuamente en la zona de reacción (reactor, despojador y regenerador) actuando como vehículo para transferir el calor del regenerador a la alimentación y al reactor.

Las reacciones de craqueo catalítico comienzan cuando la alimentación entra en contacto con el catalizador caliente en el tubo elevador y continúan hasta que los vapores son separados del catalizador en el reactor.

El catalizador saliente del reactor se denomina catalizador agotado o gastado y contiene hidrocarburos que son adsorbidos en la superficie del catalizador. Estos son removidos por despojamiento con vapor de agua antes que el catalizador entre al regenerador. [13]

### **2.2.9 Importancia de la unidad de craqueo catalítico fluidizado en las refinerías**

La unidad de CCF ocupa un lugar fundamental en una refinería debido a su relativo bajo costo de conversión de cargas pesadas a productos livianos de mayor valor. Es la productora de gasolina por excelencia. La unidad de



craqueo catalítico es la principal fuente de gas licuado de petróleo (GLP) para el uso casero comercializado en el país.

El proceso de craqueo catalítico fluidizado es de fácil operación. Actualmente existen aproximadamente 400 unidades de craqueo catalítico en todo el mundo, con una capacidad de procesamiento de 12 millones de barriles por día, lo que produce el 45% de todas las gasolinas usadas mundialmente. [14]

### **2.2.10 Fuentes de catalizador gastado en Ecuador**

La única fuente de almacenamiento de catalizador agotado en el país es la Refinería Estatal de Esmeraldas, la cual está situada en la provincia de Esmeraldas en el sector noroccidental del país, a 3.8 kilómetros de distancia del Océano Pacífico.

Fue diseñada y construida entre 1975 y 1977 para procesar 55.600 BPD. En 1987 se amplió a 90.000 BPD. Luego de 20 años en 1997 amplió sus instalaciones para procesar 110.000 BPD., adaptándose para procesar crudos más pesados, incorporando nuevas unidades para mejorar la calidad de los combustibles y minimizar el impacto ambiental.

Se encuentra a una distancia de 7 Km de la ciudad de Esmeraldas, en la vía hacia Atacames, está a 300 m. en línea recta al Río Teaone, 3 Km al Río Esmeraldas y 3,8 Km al Océano Pacífico.



**Figura 5.** Ubicación de Refinería Estatal Esmeraldas

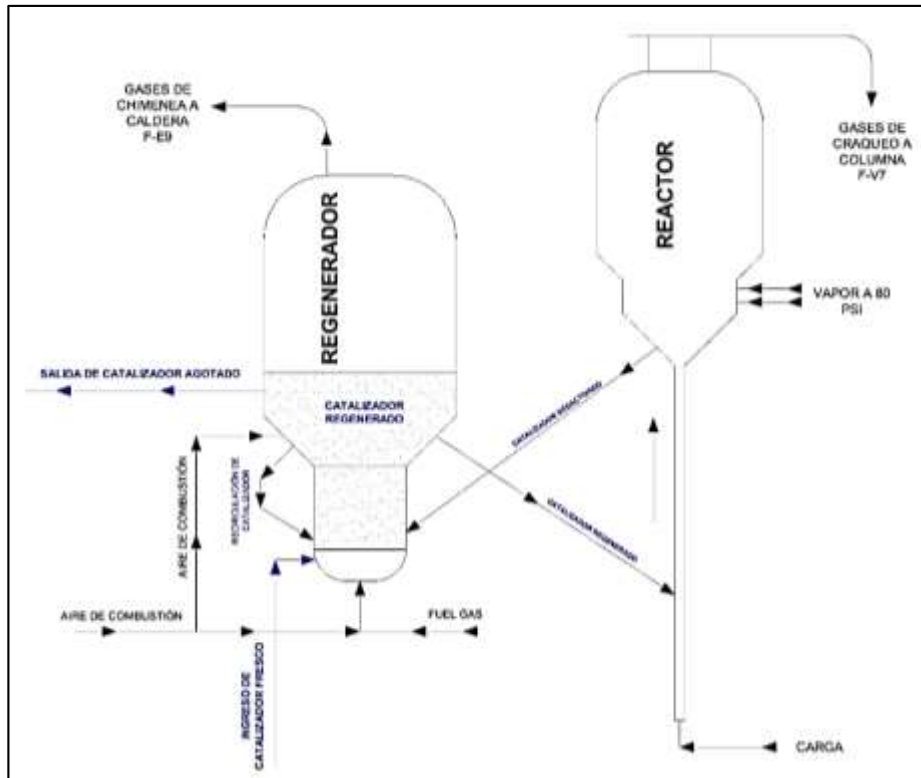
**Fuente:** Google earth

### **2.2.11 Consumo de catalizador en refinería Esmeraldas**

El Ecuador, a partir del descubrimiento y extracción de petróleo en la Península de Santa Elena Refinería La Libertad, años 1925 a 1928, y la creación de Refinería Estatal Esmeraldas, años 1975 a 1977, ha venido adquiriendo y acumulando gran cantidad de catalizador agotado proveniente de los procesos de refinación de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC por sus siglas en inglés), el mismo que luego de su aprovechamiento, se convierte en pasivo ambiental, a tal punto que se han calculado hasta la fecha 5000 toneladas de catalizador gastado reposando en el suelo. [15]

La disposición final del pasivo ambiental (Catalizador Agotado) generado por la operación de la FCCU, en tiempos anteriores, junto con el que provocará el procesamiento de residuos Post- repotenciación desarrollado durante el 2014 al 2016, que el licenciatario UOP estima en 20 Ton/día, obliga a pensar en un manejo técnico y óptimo que permita reutilizar el catalizador confinado a granel en los exteriores para lavado de metales (Flushing); así mismo, tomar en consideración la posibilidad de reutilización de este material con bajo contenido de metales en otras áreas, como la ingeniería de construcción o ingeniería de materiales y su posterior incorporación como aditivo especial del concreto. [15]

A continuación se indica el funcionamiento de la sección Reactor – Regenerador de la Unidad de Procesos de Craqueo Catalítico Fluidizado FCC, en Refinería Esmeraldas.



**Figura 6.** Diagrama de Procesos de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de Refinería Esmeraldas

*Fuente: Fuente propia*

### 2.2.12 Especificaciones del catalizador fresco adquirido por refinería

Specifications	Customer		
	Min	Typ	Max
<b>Chemical</b>			
Total Volatiles	wt%		9.0
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	wt%	45.0	
Rare Earth Oxides	wt%	2.50	2.80
Sodium (Na)	wt%	0.26	0.35
Iron (Fe)	wt%		0.85
<b>Physical</b>			
ABD	g/cc	0.73	
Davison Index	DI	5	8
Microactivity (1400oF STM)	wt%	77	80
Pore Volume	cc/g	0.41	
Surface Area	m <sup>2</sup> /g	285	305
Surface Area - Zeolite	m <sup>2</sup> /g	255	
Surface Area - Matrix	m <sup>2</sup> /g	50	
<b>Particle Size</b>			
Micro-Mesh 0-40μ	wt%	6	9
Average Particle Size	μ	80	

**Figura 7.** Especificaciones químicas y físicas del catalizador fresco

*Fuente: Ing. Marco Paucar, Ingeniería de Procesos REE*

## **2.2.13 Producción de cemento En Ecuador**

### **2.2.13.1 Crecimiento y consumo**

En el país existen cuatro empresas productoras de cemento que en los últimos años han mantenido un crecimiento sostenido, abasteciendo al Ecuador de su producto. Según datos de la Empresa Pública Cementera del Ecuador (EPCE), durante 2007 y 2012, el movimiento fue de 7% anual, mientras que en 2013, este valor alcanzó el 10% de producción con 6,6 millones de toneladas anuales. Estos acontecimientos se deben principalmente a tres factores. En primer lugar, el “boom” de la construcción como consecuencia del crecimiento sostenido de la economía, luego está la facilidad de acceder al crédito para la vivienda que se ha promovido en los últimos años, y finalmente, la significativa inversión en obras de infraestructura promovida principalmente por el sector público. Eso ha llevado al Ecuador a ocupar el tercer lugar en mayor consumo de cemento per cápita, solo detrás de Panamá y Trinidad y Tobago. [16]

En cuanto a consumo, según datos del Instituto Ecuatoriano del Cemento y la Construcción (INECYC) la creciente demanda ha llevado a que el consumo per cápita sea uno de los más altos de la región. Durante 2013 el consumo llegó a 386 kg por habitante, el más alto de la última década, si se considera que en el 2002 este indicador era de 257 kg.

Según datos de Lafarge Cementos, la segunda empresa cementera en participación del mercado nacional, estima que la tendencia de crecimiento alcanzada en el primer trimestre del 2012 se va a mantener, pues se inició la ejecución de obras importantes que demandarán este producto como las hidroeléctricas Coca Codo Sinclair, Toachi-Pilatón, carreteras, proyectos de gobiernos seccionales, entre otros. (EL UNIVERSO, 2012)

### **2.2.13.2 Inversión pública y privada**

En lo que a inversión en producción de cemento se refiere, la Cementera Nacional, de dominio público, ha invertido USD 230 millones, dinero proveniente de un socio extranjero, con lo que espera incrementar su

capacidad de producción de 1 600 a cerca de 3 600 toneladas de cemento al día.

La firma francesa Lafarge con 21% del mercado nacional es la segunda productora de cemento en el país luego de Holcim Ecuador, la cual, durante el 2012 superó la producción de 1 300 000 toneladas al año y la nómina estuvo integrada por 303 colaboradores. Un informe de la compañía asegura que la innovación es uno de los ejes principales. En la actualidad, la planta ubicada en Selva Alegre tiene una capacidad de producción de 1 600 000 toneladas de cemento, y para ello requiere una inversión elevada cercana a la de sus competidores nacionales.

Respecto a Holcim Ecuador, que ocupa la primera posición de venta de cemento a nivel nacional, se conoce que en abril del 2013 se firmó un contrato de inversión entre el Estado ecuatoriano y la compañía por USD 300 millones; a la fecha, uno de los más altos de su naturaleza dentro del sector privado industrial. [16]

### **2.3 HIPÓTESIS**

El catalizador agotado obtenido de craqueo catalítico fluidizado puede reemplazar al cemento puzolánico y a la arena en proporciones específicas, de tal manera que la resistencia a la compresión del hormigón simple fabricado con esta nueva mezcla posee iguales características que un hormigón simple constituido por materiales tradicionales sin adición de catalizador agotado.

### **2.4 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS**

- **Variable Independiente:** La resistencia a la compresión del hormigón de cemento Portland
- **Variable Dependiente:** Adición de catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 NIVEL O TIPO DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.1 Correlacional**

La investigación que se realizará es de tipo correlacional, pues existe una dependencia mutua entre la resistencia del hormigón y la calidad de los materiales con los que se fabrica. Al ser sustituido uno de estos materiales o al ser disminuido para adicionar un nuevo material como el catalizador agotado, se modifica en alguna medida la resistencia del hormigón. Mediante este tipo de investigación se determinará en qué medida se ve afectada la resistencia del hormigón, y se comprobará la hipótesis planteada.

##### **3.1.2 Nivel Explicativo**

Mediante el diseño experimental de la investigación se buscarán las relaciones causa – efecto que genera la adición de un nuevo material al hormigón simple tradicional. La causa será determinada por la sustitución o disminución de la arena y del cemento, y esto provoca un efecto inmediato en la resistencia del hormigón. No se conoce aún cuales serán estos resultados, por tal motivo se aplica el nivel explicativo para determinarlos.

#### **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA**

Para esta investigación se ha planteado como población y muestra 66 cilindros de hormigón simple, 30 cilindros con adición de catalizador en proporciones del 5, 10, 20, 30 y 55%, con una resistencia de 210 Kg/cm<sup>2</sup> tanto como reemplazo del hormigón y de la arena, 30 cilindros con adición de catalizador en proporciones del 5, 10, 20, 30 y 55%, con una resistencia de 280 Kg/cm<sup>2</sup> tanto como reemplazo del hormigón y de la arena, y 6 probetas como muestra patrón de hormigón tradicional, 3 probetas de  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> y 3 probetas de  $f'c=280$  Kg/cm<sup>2</sup> cada una. Los ensayos se realizarán bajo la norma ASTM C39, y los cilindros serán ensayados a los 28 días de edad, tiempo en el cual, la resistencia del hormigón alcanza el 99,99% de su resistencia final. La población y muestra se ha determinado de la siguiente manera:

REEMPLAZO DE CATALIZADOR COMO COMPONENTE DEL HORMIGÓN							
F'C= 210 Kg/cm <sup>2</sup>				F'C= 280 Kg/cm <sup>2</sup>			
# de Muestras	% de Reemplazo	Material reemplazado		# de Muestras	% de Reemplazo	Material reemplazado	
		Cemento	Arena			Cemento	Arena
3	Muestras patrón			3	Muestras patrón		
3	5	x	Constante	3	5	x	Constante
3	10	x	Constante	3	10	x	Constante
3	20	x	Constante	3	20	x	Constante
3	30	x	Constante	3	30	x	Constante
3	55	x	Constante	3	55	x	Constante
3	5	Constante	x	3	5	Constante	x
3	10	Constante	x	3	10	Constante	x
3	20	Constante	x	3	20	Constante	x
3	30	Constante	x	3	30	Constante	x
3	55	Constante	x	3	55	Constante	x
33		Constante		33		Constante	
<b>TOTAL =</b>	<b>66</b>						

*Figura 8. Determinación de la población y muestra*

*Fuente: Fuente propia*

### 3.2.1 Justificación de la muestra

Los porcentajes de catalizador agotado de craqueo catalítico como sustitución del cemento y la arena se han planteado, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Basándose en estudios anteriores, en su mayoría se han planteado sustituciones del cemento y de la arena en porcentajes del 5, 10, 15, 20, 30% y se han obtenido gran cantidad de datos y resultados, mediante los cuales se concluye que la cantidad óptima de catalizador que puede utilizarse es del 20%. Debido a que en Ecuador no se han realizado estudios de este tipo, la presente investigación partirá de los estudios mencionados, obteniendo sus propios resultados debido a que el catalizador a utilizar proveniente de Refinería Esmeraldas tiene sus propias características.
- b) El catalizador presenta una porosidad moderada, que al sumarla a la porosidad el cemento portland o de la arena, una vez fabricadas las muestras con un porcentaje entre el 25, 30 o 50%, se producirá una alta porosidad, dando como resultado un hormigón menos resistente.

- c) El catalizador agotado es un componente sólido que presenta alta cantidad de alúmina y óxido de silicio con contenidos en peso de 45,5 y 49,77 respectivamente. Se conoce que al incrementar mayor cantidad de sólidos en la pasta de cemento se requiere incrementar la relación agua/cemento, es decir, a medida que se incrementa el catalizador agotado es necesario incrementar la cantidad de agua de amasado.; como consecuencia de este proceso se puede producir una disminución en la resistencia del concreto. En este caso es prudente mantenerse en un porcentaje de sustitución de hasta el 30%, como se plantea en el presente estudio y el 55% para comprobar qué resultados se producen.
- d) La capacidad de trabajo del hormigón se relaciona directamente con la relación agua cemento, debido a que el agua permite la fluidez de los componentes del hormigón. En el caso de que se mantenga constante la relación agua/cemento con los porcentajes de catalizador agotado planteados en este estudio, la trabajabilidad del hormigón se verá influenciada de tal manera que se dificulte su amasado. Esto se debe a que al sustituir el cemento por un material menos denso y con una capacidad de absorción de agua alta; y al ser la dosificación por peso, las pastas con adición presentan un mayor volumen de sólido y por tanto mayor cantidad de partículas que deben hidratarse con el agua, generando una mezcla muy seca o de baja consistencia normal. Por tal motivo se ira sustituyendo el cemento y la arena con catalizador en porcentajes bajos como es el 5% hasta el 30%, y el 55% se lo realiza para encontrar un punto de inflexión donde la resistencia del concreto con este material empieza a disminuir.
- e) Debido a que en la presente investigación no se plantea el uso de otros aditivos como plastificantes para mejorar la trabajabilidad del hormigón, y que la resistencia de diseño del concreto es alta, no es necesario incrementar la cantidad de materiales sólidos en la mezcla debido a que se requerirá mayor cantidad de agua de amasado. Por lo tanto el 5, 10, 20% son considerados aceptables para sustitución de la arena y del concreto. Con los otros porcentajes se espera conocer que efectos se producen en el hormigón fresco y endurecido.



- f) Mediante el estudio de las propiedades químicas del cemento, de la arena y del catalizador agotado y haciendo una relación entre cada propiedad de los materiales, se han planteado porcentajes del 5, 10, 15% que son relativamente bajos determinar el comportamiento de las muestras. El 20, 30 y 55% son porcentajes altos de sustitución y se han planteado para conocer cómo se comporta el hormigón a medida que se incrementa el porcentaje de catalizador agotado.

### **3.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS**

Para el procesamiento y análisis de resultados se aplicarán como técnicas los ensayos de laboratorio pertinentes a fin de determinar la resistencia y calidad del hormigón y como instrumento se empleará la máquina de compresión.

Se determinarán y procesarán los resultados de estos ensayos según las siguientes actividades:

- Se recolectará gran cantidad de información bibliográfica con el objeto de conocer, comprender y sustentar la investigación en desarrollo.
- Se realizarán los siguientes ensayos de laboratorio en los agregados finos y gruesos de acuerdo a las siguientes normas:
  - Densidad real de la arena: Norma INEN 856
  - Densidad real del ripio: Norma INEN 857
  - Densidad aparente (suelta) y densidad compactada de los agregados, densidad compactada de la mezcla (arena y ripio): Norma INEN 858
  - Granulometría del agregado fino y del agregado grueso: Norma INEN 696
- Se procederá a calcular la dosificación de cada muestra de hormigón con su respectivo porcentaje de catalizador, para obtener un hormigón de 280 Kg/cm<sup>2</sup>, según el método de la Universidad Central.
- Se tomarán las muestras conforme a las normas ASTM C 31 y se determinarán las propiedades del hormigón en estado fresco, según la norma NTE INEN 1-576, ASTM C 39.

- Una vez tomadas las muestras y cumplido el fraguado inicial se procederá a curar el hormigón hasta los veinte y ocho días de edad, según la norma NTE INEN 1 576.
- Una vez curado el hormigón y endurecido se procederá a medir su densidad según norma NTE INEN 1 579, ASTM C 39.
- Se ensayarán las probetas de hormigón en la máquina de compresión para determinar su resistencia. Luego, deben determinarse las resistencias medias entre las muestras de hormigón adicionado con catalizador agotado, según norma ASTM C 39.
- Se medirán y caracterizarán las variables de la hipótesis de acuerdo a los resultados que arrojen las pruebas.
- Los datos obtenidos serán planteados en forma de gráficas y tablas que permitan interpretar de manera más sencilla lo que éstos representan.
- Concluidas estas actividades se plantearán conclusiones y recomendaciones, además que se pueden plantear otros criterios para la disposición final del catalizador.

Mediante el proceso descrito anteriormente, se realizará un análisis para determinar si existe relación entre las variables y los resultados obtenidos, y con esta información se procederá a comprobar la hipótesis.

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los datos obtenidos de los ensayos realizados en los cilindros de hormigón elaborados con catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado, con resistencias a la compresión planteadas para un hormigón estructural y ensayados a los 28 días de edad para garantizar una certeza del 99,99% de su capacidad resistente.

#### **4.1 Ensayos realizados en los agregados**

##### **4.1.1 Datos químicos del catalizador agotado**

##### **4.1.2 Agregado fino**

- Análisis Granulométrico
- Peso Unitario Suelto
- Peso Unitario Compactado
- Peso Específico

##### **4.1.3 Agregado Grueso**

- Análisis Granulométrico
- Peso Unitario Suelto
- Peso Unitario Compactado
- Peso Específico

PROPIEDADES QUÍMICAS	CANTIDAD	UNIDADES
Total SA	174.5	m <sup>2</sup> /g
Zeolita SA	141.06	m <sup>2</sup> /g
Matriz SA	33.47	m <sup>2</sup> /g
Níquel	253.12	ppm
Vanadio	394.29	ppm
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	45.5	wt%
Óxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	49.77	wt%
Densidad Suelta Promedio	0.82	g/cc
Volumen de Poro	0.41	cc/g

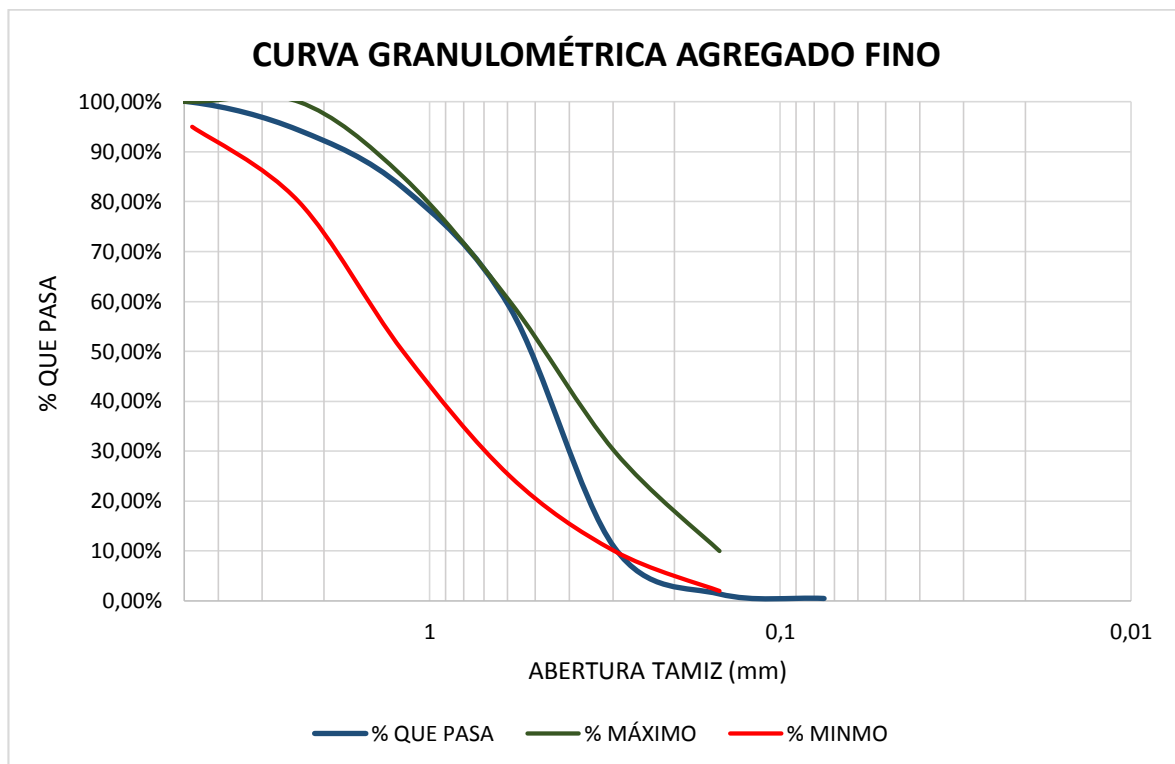
**Tabla 7.** Propiedades químicas del catalizador agotado

**Fuente:** Suministrado por Ing. Marco Paucar, analista de EP Petroecuador bajo Memorando N° 00610-VCD-CAP-2015

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO							
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA							
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"							
<b>REALIZADO POR:</b>		LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL V.					
<b>FECHA:</b>		05/11/2015	<b>SITIO:</b>		LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
<b>NORMA:</b>		INEN 696					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO							
<b>PESO MUESTRA:</b>		500				gr	
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO EN gr (Corregido)		% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	LÍMITES ASTM-C33	
		PARCIAL	ACUMULADO			MÁXIMO	MÍNIMO
3/8"	9.5	0	0	0.00%	100.00%	100%	
# 4	4.75	0.7	0.7	0.14%	99.86%	100%	95%
# 8	2.36	28.3	29	5.80%	94.20%	100%	80%
# 16	1.19	57.9	86.9	17.38%	82.62%	85%	50%
# 30	0.590	120.5	207.4	41.48%	58.52%	60%	25%
# 50	0.297	240.6	448	89.60%	10.40%	30%	10%
# 100	0.149	46.8	494.8	98.96%	1.04%	10%	2%
# 200	0.075	4.8	499.6	99.92%	0.08%		
FUENTE		0.4	500	100.00%	0.00%		
		500					
<b>MÓDULO DE FINURA</b>				2.53			
<b>PORCENTAJE DE PÉRDIDA =</b>				0.00		%	

**Tabla 8.** Análisis granulométrico del agregado fino

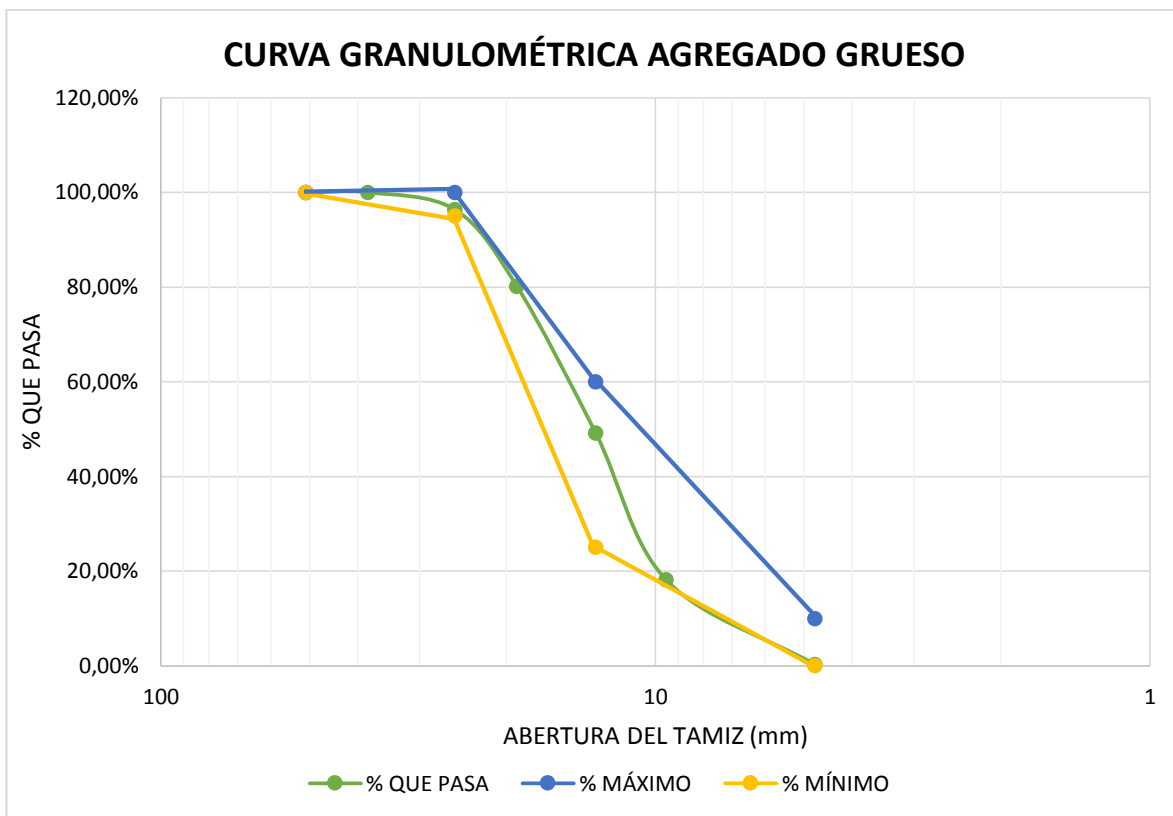
**Fuente:** Fuente propia



*Figura 9. Curva granulométrica agregado fino  
Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO							
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA							
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"							
REALIZADO POR:		LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL V.					
FECHA:		05/11/2015	SITIO:		LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
NORMA:		INEN 696					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO							
PESO MUESTRA:		5000		gr	TMN:	1"	
TAMIZ	ABERTURA (mm)	RETENIDO EN gr		% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	LÍMITES ASTM-C33	
		PARCIAL	ACUMULADO			MÁXIMO	MÍNIMO
2"	50.8	0	0	0.00%	100.00%	100%	100%
1 1/2"	38.1	0	0	0.00%	100.00%		
1"	25.4	183	183	3.66%	96.34%	100%	95%
3/4"	19.05	808	991	19.82%	80.18%		
1/2"	13.2	1550	2541	50.82%	49.18%	60%	25%
3/8"	9.5	1553	4094	81.88%	18.12%		
#4	4.75	893	4987	99.74%	0.26%	10%	0%
FUENTE		12	4999	99.98%	0.02%		
		<b>4999</b>					
PORCENTAJE DE PÉRDIDA =				0.02		%	

*Tabla 9. Análisis granulométrico del agregado grueso  
Fuente: Fuente propia*



**Figura 10.** Curva granulométrica agregado grueso  
Fuente: Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL V.			
<b>FECHA:</b>	05/11/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA	
<b>NORMA:</b>	INEN 858			
PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
<b>MASA RECIPIENTE:</b>	10.2		Kg	
<b>VOLUMEN RECIPIENTE:</b>	20.15		dm <sup>3</sup>	
<b>Agregado</b>	<b>Agregado + recipiente</b>	<b>Agregado Kg</b>	<b>Densidad Kg/dm<sup>3</sup></b>	<b>Densidad prom. Kg/dm<sup>3</sup></b>
<b>Fino</b>	41.20	31.00	1.54	1.505
	39.80	29.60	1.47	
<b>Grueso</b>	39.10	28.90	1.43	1.425
	38.90	28.70	1.42	

**Tabla 10.** Peso unitario suelto del agregado grueso y fino  
Fuente: Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL V.			
<b>FECHA:</b>	05/11/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA	
<b>NORMA:</b>	INEN 858			
PESO UNITARIO (COMPACTADO) DE LOS AGREGADOS				
<b>MASA RECIPIENTE:</b>	10.2		Kg	
<b>VOLUMEN RECIPIENTE:</b>	20.15		dm3	
<b>Agregado</b>	<b>Agregado + recipiente</b>	<b>Agregado Kg</b>	<b>Densidad Kg/dm3</b>	<b>Densidad prom. Kg/dm3</b>
<b>Fino</b>	43.80	33.60	1.67	1.665
	43.60	33.40	1.66	
<b>Grueso</b>	39.20	29.00	1.44	1.495
	41.40	31.20	1.55	

*Tabla 11. Peso unitario (compactado) de los agregados  
Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"								
<b>REALIZADO POR:</b>		LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL V.						
<b>FECHA:</b>		05/11/2015	<b>SITIO:</b>		LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA			
PESO UNITARIO COMPACTADO DE LA MEZCLA								
<b>NORMA:</b>		INEN 858						
<b>Masa del recipiente</b>		10.2			Kg			
<b>Volumen del recipiente</b>		20.15			dm3			
% MEZCLA		CANTIDAD Kg		FINO AÑADIDO Kg	AGREGADO + RECIPIENTE Kg	AGREGADO Kg	DENSIDAD A. Kg/dm3	DENSIDAD P. MEZCLA Kg/dm3
RIPIO	ARENA	RIPIO	ARENA	ARENA				
100	0	40	0	0	41.20	31.00	1.54	1.54
					41.20	31.00	1.54	
90	10	40	4.44	4.44	42.50	32.30	1.60	1.60
					42.20	32.00	1.59	
80	20	40	10	5.56	45.80	35.60	1.77	1.79
					46.80	36.60	1.82	
70	30	40	17.14	7.14	48.00	37.80	1.88	1.88
					48.10	37.90	1.88	
60	40	40	26.67	9.53	50.40	40.20	2.00	1.99
					50.30	40.10	1.99	
50	50	40	40	13.33	51.00	40.80	2.02	2.06
					52.30	42.10	2.09	
40	60	40	60	20	50.50	40.30	2.00	1.94
					48.20	38.00	1.89	

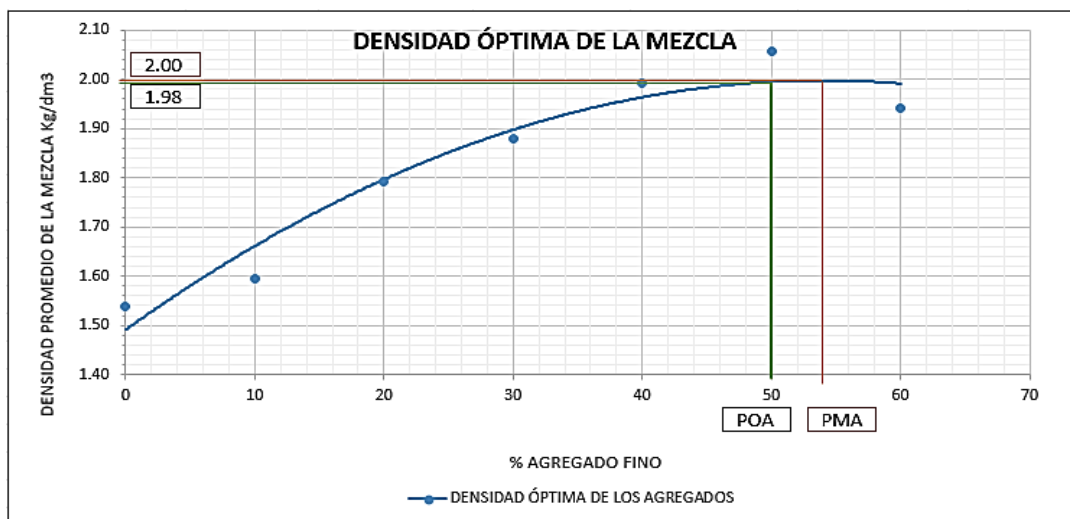


Figura 11. Densidad óptima de la mezcla  
Fuente: Fuente propia

<b>PORCENTAJE MÁXIMO AGREGADO FINO=</b>	54%
<b>PORCENTAJE MÁXIMO AGREGADO GRUESO=</b>	46%
<b>PORCENTAJE ÓPTIMO AGREGADO FINO=</b>	50%
<b>PORCENTAJE ÓPTIMO AGREGADO GRUESO=</b>	50%
<b>PESO UNITARIO MÁXIMO=</b>	2,00
<b>PESO UNITARIO ÓPTIMO=</b>	1,980

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"			
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO			
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA		
<b>FECHA:</b>	05/11/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA
DENSIDAD REAL DEL AGREGADO GRUESO			
<b>NORMA:</b>	INEN 857		
PROCESO	DENOMINACION	DATOS	UNIDAD
Masa canastilla en el aire	m1	1239.00	gr
Masa canastilla + Agregado SSS en el aire.	m2	9047.00	gr
Masa Agregado SSS en el aire (m2-m1)	Msss	7808.00	gr
Masa canastilla + Agregado SSS en el agua.	m3	5826.00	gr
Masa canastilla en el agua.	m4	1084.00	gr
Masa del agregado en el agua (m3-m4)	Magua	4742.00	gr
Volumen del Agregado (Msss-Magua)/dagua	Vsss	3066.00	cm3
Densidad real ripio (Msss/Vsss)	<b>DRR</b>	<b>2.547</b>	<b>gr/cm3</b>

Tabla 12. Densidad real del agregado grueso  
Fuente: Fuente propia



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			
<b>FECHA:</b>	05/11/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AGREGADO FINO				
<b>NORMA:</b>	INEN 856			
PROCESO	DENOMINACIÓN	DATOS	UNIDAD	
Masa del Frasco	m1	146.40	gr	
Masa del frasco + agregado (SSS)	m2	529.20	gr	
Masa del frasco + agregado (SSS) + agua	m3	865.20	gr	
Masa agua añadida (m3 - m2)	m4	336.00	gr	
Masa de frasco + 500cc agua	m5	643.60	gr	
Masa de 500cc agua (m5 - m1)	m6	497.20	gr	
Densidad del agua (m6/500ml)	da	0.99	gr/cm3	
Masa de agua desalojada por el agregado (m6 - m4)	m7	161.20	gr	
Masa del agregado (m2 - m1)	Msss	382.80	gr	
Volumen de agua desalojada (m7/da)	Vsss	162.11	cm3	
Densidad real de la arena (Msss/Vsss)	<b>DRA</b>	<b>2.361</b>	<b>gr/cm3</b>	

*Tabla 13. Densidad del agregado fino  
Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			
<b>FECHA:</b>	05/11/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA	
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO				
PROCESO	DENOMINACIÓN	M1	M2	UNIDAD
Masa del picnómetro	M1	162.6	162.5	gr
Masa del picnómetro + cemento	M2	288.7	356.1	gr
Masa del picnómetro + cemento + gasolina	M3	625.3	675.3	gr
Masa gasolina añadida	M4=M3-M2	336.6	319.2	gr
Masa del picnómetro + 500 cm3 gasolina	M5	529.4	530	gr
Masa 500 cm3 gasolina	M6=M5-M1	366.8	367.5	gr
Densidad de la gasolina	DG=M6/500	0.734	0.735	gr/cm3
Masa gasolina desalojada por el cemento	M7=M6-M4	30.2	48.3	gr
Masa de cemento	MC=M2-M1	126.1	193.6	gr
Volumen de gasolina desalojada	VG=M7/DG	41.17	65.71	cm3
Densidad real del cemento	DRC=MC/VG	3.063	2.946	gr/cm3
Densidad real promedio del cemento	P=(DRC1 + DRC2)/2	<b>3.005</b>		<b>gr/cm3</b>

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"		
RESUMEN DE RESULTADOS		
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA	
<b>FECHA:</b>	05/11/2015	
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA	
AGREGADO GRUESO		
PROPIEDAD MECÁNICA	UNIDAD	VALOR
Tamaño Nominal Máximo	PLG	1
Peso Unitario Suelto	gr/cm <sup>3</sup>	1.425
Peso Unitario Compactado	gr/cm <sup>3</sup>	1.495
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	2.547
AGREGADO FINO		
Módulo de finura	-	2.53
Peso Unitario Suelto	gr/cm <sup>3</sup>	1.505
Peso Unitario Compactado	gr/cm <sup>3</sup>	1.665
Peso Específico	gr/cm <sup>3</sup>	2.361
MEZCLA ÓPTIMA (RIPIO + ARENA)		
PORCENTAJE ÓPTIMO AGREGADO FINO=	%	50
PORCENTAJE ÓPTIMO AGREGADO GRUESO=	%	50
PESO UNITARIO MÁXIMO=	gr/cm <sup>3</sup>	2
PESO UNITARIO ÓPTIMO=	gr/cm <sup>3</sup>	1.98

*Tabla 14. Resumen de resultados*  
*Fuente: Fuente propia*

#### **4.1.4 Dosificación de hormigones: Método de Dosificación de Hormigones según la Universidad Central del Ecuador**

Una vez determinadas las propiedades mecánicas de los agregados en estudio se procede a realizar los correspondientes cálculos de dosificación para hormigones de resistencias y asentamientos especificados para este estudio; el Método a aplicarse es el desarrollado por la Universidad Central del Ecuador.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"		
DATOS PARA DISEÑO DE HORMIGÓN $f'c= 210 \text{ Kg/cm}^2$		
REALIZADO POR:	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA	
PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES
VOLUMEN DEL HORMIGÓN	1000	dm <sup>3</sup>
$f'c$	180	Kg/cm <sup>2</sup>
ASENTAMIENTO	6-9	cm
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO (DRC)	3.005	Kg/dm <sup>3</sup>
DENSIDAD REAL DE LA ARENA (DRA)	2.361	Kg/dm <sup>3</sup>
DENSIDAD REAL DEL RIPIO (DRR)	2.547	Kg/dm <sup>3</sup>
PORCENTAJE ÓPTIMO DE ARENA (POA)	50	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE RIPIO (POR)	50	%
DENSIDAD ÓPTIMA DE LOS AGREGADOS (DOAg)	1.98	Kg/dm <sup>3</sup>
AIRE	2	%
VOLUMEN DE AIRE	20	dm <sup>3</sup>

*Tabla 15. Datos de diseño para hormigón 210 Kg/cm<sup>2</sup>*

*Fuente: Fuente propia*

### 1. Densidad real del agregado (DRAg)

$$DRAg = DRA \cdot POA + DRR \cdot POR$$

$$DRAg = 2.361 \cdot 0.5 + 2.547 \cdot 0.5$$

$$DRAg = 2.454 \text{ Kg/dm}^3$$

### 2. Porcentaje óptimo de vacíos

$$POV\% = \frac{(DRAg - DOAg)}{DRAg} * 100$$

$$POV\% = \frac{(2.454 - 1.980)}{2.454} * 100$$

$$POV\% = 19.32\%$$

$$POV = \frac{POV\% * \text{volumen del hormigón}}{100}$$

$$POV = \frac{19.32 * 1000 \text{ dm}^3}{100}$$

$$POV = 193.20 \text{ dm}^3$$

### 3. Cantidad de pasta (CP)

Para el cálculo de la cantidad de pasta se requieren el coeficiente  $k$ , obtenido de las siguientes tablas:

AENTAMIENTO (cm)	K
0 - 3	1.04
3 - 6	1.08
<b>6 - 9</b>	<b>1.11</b>
9 - 12	1.13
12 - 15	1.14

**Tabla 16.** Tabla de asentamiento y coeficiente  $K$   
*Fuente:* Tesis Srta. Amores Myriam, FICM – UTA, 2013

$$CP = K \cdot POV$$

$$CP = 1.11 \cdot 193.20 \text{ dm}^3$$

$$CP = 214.452 \text{ dm}^3$$

### 4. Relación agua cemento

La relación a/c se selecciona de la siguiente tabla dependiendo de la resistencia que desea obtenerse:

$f^c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	W/C
140	0.77
180	0.70
<b>210</b>	<b>0.62</b>
240	0.59
280	0.56
350	0.45

**Tabla 17.** Relación a/c  
*Fuente:* Tesis Srta. Amores Myriam, FICM – UTA, 2013

$$W/C = 0.62$$

### 5. Cálculo de la cantidad de los materiales

#### a. Cantidad de cemento

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

$$C = \frac{214.452 \text{ dm}^3}{(0.62)} + \frac{1}{3.005 \text{ Kg/dm}^3}$$

$$C = 346.22 \text{ kg}$$

**b. Cantidad de agua (W)**

$$W = C*(W/C)$$

$$W = 346.22 \text{ kg} * 0.62$$

$$W = 214.66 \text{ Kg o lt}$$

**c. Cantidad de arena (A)**

$$A = (1000 - CP - AIRE)*DRA*POA$$

$$A = (1000 - 214.452 - 20)* 2.361*0.5$$

$$A = 903.73 \text{ Kg}$$

**d. Cantidad de ripio**

$$R = (1000 - CP - AIRE)*DRR*POA$$

$$R = (1000 - 214.452 - 20)* 2.547*0.5$$

$$R = 974.93 \text{ Kg}$$

**DOSIFICACIÓN AL PESO  $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$**

<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (Kg)</b>	<b>Dosif. Peso</b>	<b>MATERIAL PARA 0.018 m3 (3 cilindros)</b>
<b>W</b>	214.66	0.62	4.34
<b>C</b>	346.22	1.00	7.00
<b>A</b>	903.73	2.61	18.27
<b>R</b>	974.93	2.82	19.74

*Tabla 18. Dosificación al peso, hormigón convencional  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$*

*Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"		
DATOS PARA DISEÑO DE HORMIGÓN $f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
REALIZADO POR:	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA	
PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES
VOLUMEN DEL HORMIGÓN	1000	dm <sup>3</sup>
$f'_c$	180	Kg/cm <sup>2</sup>
ASENTAMIENTO	6-9	cm
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO (DRC)	3.005	Kg/dm <sup>3</sup>
DENSIDAD REAL DE LA ARENA (DRA)	2.361	Kg/dm <sup>3</sup>
DENSIDAD REAL DEL RIPIO (DRR)	2.547	Kg/dm <sup>3</sup>
PORCENTAJE ÓPTIMO DE ARENA (POA)	50	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE RIPIO (POR)	50	%
DENSIDAD ÓPTIMA DE LOS AGREGADOS (DOAg)	1.980	Kg/dm <sup>3</sup>
AIRE	2	%
VOLUMEN DE AIRE	20	dm <sup>3</sup>

*Tabla 19. Datos de los materiales para dosificación del hormigón  $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$   
Fuente: Fuente propia*

### 1. Densidad real del agregado (DRAg)

$$DRAg = DRA * POA + DRR * POR$$

$$DRAg = 2.361 * 0.5 + 2.547 * 0.5$$

$$DRAg = 2.454 \text{ Kg/dm}^3$$

### 2. Porcentaje óptimo de vacíos

$$POV\% = \frac{(DRAg - DOAg)}{DRAg} * 100$$

$$POV\% = \frac{(2.454 - 1.980)}{2.454} * 100$$

$$POV\% = 19.32\%$$

$$POV = \frac{POV\% * \text{volumen del hormigón}}{100}$$

$$POV = \frac{19.32 * 1000 \text{ dm}^3}{100}$$

$$POV = 193.20 \text{ dm}^3$$

### 3. Cantidad de pasta (CP)

Para el cálculo de la cantidad de pasta se requieren el coeficiente  $k$ , obtenido de las siguientes tablas:

AENTAMIENTO (cm)	K
0 - 3	1.04
3 - 6	1.08
<b>6 - 9</b>	<b>1.11</b>
9 - 12	1.13
12 - 15	1.14

*Tabla 20. Tabla de asentamiento y coeficiente K*

*Fuente: Tesis Srta. Amores Myriam, FICM – UTA, 2013*

$$CP = K \cdot POV$$

$$CP = 1.11 \cdot 193.20 \text{ dm}^3$$

$$CP = 214.452 \text{ dm}^3$$

### 4. Relación agua cemento

La relación a/c se selecciona de la siguiente tabla dependiendo de la resistencia que desea obtenerse:

f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	W/C
140	0.77
180	0.70
210	0.62
240	0.59
<b>280</b>	<b>0.56</b>
350	0.45

*Tabla 21. Relación a/c*

*Fuente: Tesis Srta. Amores Myriam, FICM – UTA, 2013*

$$W/C = 0.56$$

### 5. Cálculo de la cantidad de los materiales

#### a. Cantidad de cemento

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

$$C = \frac{214.452 \text{ dm}^3}{(0.56)} + \frac{1}{3.005 \text{ Kg/dm}^3}$$

$$C = 383.28 \text{ kg}$$

**b. Cantidad de agua (W)**

$$W = C \cdot (W/C)$$

$$W = 383.28 \text{ kg} \cdot 0.56$$

$$W = 214.64 \text{ Kg o lt}$$

**c. Cantidad de arena (A)**

$$A = (1000 - CP - AIRE) \cdot DRA \cdot POA$$

$$A = (1000 - 214.452 - 20) \cdot 2.361 \cdot 0.5$$

$$A = 903.73 \text{ Kg}$$

**d. Cantidad de ripio**

$$R = (1000 - CP - AIRE) \cdot DRR \cdot POA$$

$$R = (1000 - 214.452 - 20) \cdot 2.547 \cdot 0.5$$

$$R = 974.93 \text{ Kg}$$

**DOSIFICACIÓN AL PESO  $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (Kg)</b>	<b>Dosif. Peso</b>	<b>MATERIAL PARA 0.018 m3 (3 cilindros)</b>
<b>W</b>	214.64	0.56	3.92
<b>C</b>	383.28	1.00	7.00
<b>A</b>	903.73	2.36	16.52
<b>R</b>	974.93	2.54	17.78

*Tabla 22. Cantidad de materiales para hormigón  $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$   
Fuente: Fuente propia*



**Dosificación del hormigón adicionando catalizador agotado de craqueo  
catalítico fluidizado – reemplazo de cemento**

**HORMIGÓN  $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$**

<b>REEMPLAZO 5% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	6.65
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	18.27
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		0.35

<b>REEMPLAZO 10% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	6.3
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	18.27
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		0.7

<b>REEMPLAZO 20% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	5.6
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	18.27
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		1.4

<b>REEMPLAZO 30% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	4.9
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	18.27
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		2.1

<b>REEMPLAZO 55% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	3.15
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	18.27
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		3.85

**Dosificación del hormigón adicionando catalizador agotado de craqueo  
catalítico fluidizado – reemplazo de arena**

**HORMIGÓN  $f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$**

<b>REEMPLAZO 5% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	7
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	17.3565
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		0.9135

<b>REEMPLAZO 10% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	7
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	16.443
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		1.827

<b>REEMPLAZO 20% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	7
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	14.616
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		3.654

<b>REEMPLAZO 30% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	7
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	12.789
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		5.481

<b>REEMPLAZO 55% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
COMPONENTE	CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg	CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg
CEMENTO	7	7
AGUA	4.34	4.34
ARENA	18.27	8.2215
RIPIO	19.74	19.74
CATALIZADOR		10.685

**Dosificación del hormigón adicionando catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado – reemplazo de cemento**

**HORMIGÓN  $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

<b>REEMPLAZO 5% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
<b>CEMENTO</b>	7	6.65
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	16.52
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		0.35

<b>REEMPLAZO 10% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
<b>CEMENTO</b>	7	6.3
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	16.52
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		0.7

<b>REEMPLAZO 20% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
<b>CEMENTO</b>	7	5.6
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	16.52
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		1.4

<b>REEMPLAZO 30% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
<b>CEMENTO</b>	7	4.9
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	16.52
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		2.1

<b>REEMPLAZO 55% CEMENTO CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
<b>CEMENTO</b>	7	3.15
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	16.52
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		3.85

**Dosificación del hormigón adicionando catalizador agotado de craqueo catalítico  
fluidizado – reemplazo de arena**

**HORMIGÓN  $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$**

<b>REEMPLAZO 5% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
CEMENTO	7	7
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	15.694
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		0.826

<b>REEMPLAZO 10% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
CEMENTO	7	7
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	14.868
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		1.652

<b>REEMPLAZO 20% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
CEMENTO	7	7
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	13.216
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		3.304

<b>REEMPLAZO 30% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
CEMENTO	7	7
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	11.564
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		4.956

<b>REEMPLAZO 55% ARENA CON CATALIZADOR</b>		
$f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$		
<b>VOL.PROBETA=</b>	0.0053	m3
<b>No. PROBETAS</b>	3	
<b>VOL. HORMIGÓN=</b>	0.018	m3
<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD NECESARIA POR VOLUMEN Kg</b>	<b>CANTIDAD REEMPLAZANDO CEMENTO Kg</b>
CEMENTO	7	7
AGUA	3.92	3.92
ARENA	16.52	7.434
RIPIO	17.78	17.78
CATALIZADOR		9.086

#### 4.1.5 Determinación del Peso específico del Hormigón fresco

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"						
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN FRESCO						
<b>REALIZA:</b>	GABRIELA PEÑAFIEL			<b>NORMA:</b>	INEN 1576 - INEN 1578	
<b>VOLUMEN:</b>	0.018 m <sup>3</sup>	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA			
DESCRIPCIÓN	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA (cm)	HOMOGENEIDAD	AGUA DE AMASADO (lts)		RELACIÓN W/C
				CALCULADA	PUESTA EN OBRA	
<b>f'c = 210 Kg/cm<sup>2</sup></b>						
FECHA:		20/11/2015				
<b>Muestras patrón</b>	<b>Buena</b>	<b>6 - 9</b>	<b>Media</b>	<b>4.34</b>	<b>4.34</b>	<b>W/C</b>
FECHA:		30/11/2015				
5% reemplazo del cemento	Buena	6 - 9	Media	4.34	4.80	0.69
10% reemplazo del cemento	Buena	6 - 9	Media	4.34	5.30	0.76
20% reemplazo del cemento	Regular	6 - 9	Media	4.34	5.90	0.84
30% reemplazo del cemento	Regular	6 - 9	Media	4.34	6.40	0.91
55% reemplazo del cemento	Mala	6 - 9	Media	4.34	7.00	1.00
FECHA:		04/11/2015				
5% reemplazo de la arena	Buena	6 - 9	Media	4.34	4.80	0.69
10% reemplazo de la arena	Buena	6 - 9	Media	4.34	5.50	0.79
20% reemplazo de la arena	Regular	6 - 9	Media	4.34	6.00	0.86
30% reemplazo de la arena	Regular	6 - 9	Media	4.34	7.50	1.07
55% reemplazo de la arena	Mala	6 - 9	Media	4.34	8.30	1.19
<b>f'c = 280 Kg/cm<sup>2</sup></b>						
FECHA:		20/11/2015				
<b>Muestras patrón</b>	<b>Buena</b>	<b>6 - 9</b>	<b>Media</b>	<b>3.92</b>	<b>3.92</b>	<b>W/C</b>
FECHA:		05/12/2015				
5% reemplazo del cemento	Buena	6 - 9	Media	3.92	4.30	0.61
10% reemplazo del cemento	Buena	6 - 9	Media	3.92	4.70	0.67
20% reemplazo del cemento	Regular	6 - 9	Media	3.92	5.20	0.74
30% reemplazo del cemento	Regular	6 - 9	Media	3.92	5.70	0.81
55% reemplazo del cemento	Mala	6 - 9	Media	3.92	6.30	0.90
FECHA:		05/12/2015				
5% reemplazo de la arena	Buena	6 - 9	Media	3.92	4.80	0.69
10% reemplazo de la arena	Buena	6 - 9	Media	3.92	5.10	0.73
20% reemplazo de la arena	Regular	6 - 9	Media	3.92	5.50	0.79
30% reemplazo de la arena	Regular	6 - 9	Media	3.92	6.10	0.87
55% reemplazo de la arena	Mala	6 - 9	Media	3.92	6.80	0.97

*Tabla 23. Propiedades mecánicas del hormigón fresco*

*Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"					
REALIZADO POR:		LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			
FECHA:	20/11/2015	SITIO:	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO (MUESTRAS PATRÓN)					
NORMA:	NTE INEN 1-579		VOLUMEN DEL MOLDE:		0.00544 m3
PROBETA #	PESO CILINDRO	H° + CILINDRO	PESO H°	DENSIDAD H°	DENSIDAD PROMEDIO
f'c=210 Kg/cm2					
M1	11.20	23.60	12.40	2279.41	2285.54
M2	11.60	24.00	12.40	2279.41	
M3	11.30	23.80	12.50	2297.79	
f'c=280 Kg/cm2					
M4	11.40	23.90	12.50	2297.79	2334.56
M5	11.40	24.10	12.70	2334.56	
M6	9.00	21.90	12.90	2371.32	

*Tabla 24. Densidad del hormigón fresco (muestras patrón)*  
*Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"					
REALIZADO:		LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			
FECHA:	30/11/2015	SITIO:	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO f'c=210 KG/CM <sup>2</sup> CON CATALIZADOR AGOTADO					
NORMA:	NTE INEN 1-579		VOLUMEN DEL MOLDE:		0.00544 m3
PROBETA #	PESO CILINDRO	H°+CILIN.	PESO H°	DENSIDAD H°	DENSIDAD PROM.
REEMPLAZO CEMENTO 5%					
M7	11.6	24	12.4	2279.41	2316.18
M8	11.4	24	12.6	2316.18	
M9	11.4	24.2	12.8	2352.94	
REEMPLAZO CEMENTO 10%					
M10	11.4	24.1	12.7	2334.56	2340.69
M11	11.3	24.1	12.8	2352.94	
M12	11.4	24.1	12.7	2334.56	
REEMPLAZO CEMENTO 20%					
M13	11.6	23.8	12.2	2242.65	2285.54
M14	11.4	23.9	12.5	2297.79	
M15	11.4	24	12.6	2316.18	
REEMPLAZO CEMENTO 30%					
M16	11.6	23.8	12.2	2242.65	2254.9
M17	11.5	23.7	12.2	2242.65	
M18	11.6	24	12.4	2279.41	
REEMPLAZO CEMENTO 55%					
M19	11.2	23.7	12.5	2297.79	2264.09
M20	11.6	23.8	12.2	2242.65	
M21	11.4	23.65	12.25	2251.84	

*Tabla 25. Densidad del hormigón fresco f'c=210 Kg/cm2, reemplazo del cemento*  
*Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"					
REALIZADO POR:	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA				
FECHA:	04/12/2015	SITIO:	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO $f'_c=210$ Kg/cm <sup>2</sup> CON CATALIZADOR AGOTADO					
NORMA:	NTE INEN 1-579		VOLUMEN DEL MOLDE:		0.00544 m <sup>3</sup>
PROBETA #	PESO CILINDRO	H°+CILINDRO	PESO H°	DENSIDAD H°	DENSIDAD PROMEDIO
REEMPLAZO ARENA 5%					
M22	11.40	23.90	12.50	2297.79	2297.79
M23	11.40	24.00	12.60	2316.18	
M24	11.40	23.80	12.40	2279.41	
REEMPLAZO ARENA 10%					
M25	11.40	23.60	12.20	2242.65	2273.29
M26	11.50	23.80	12.30	2261.03	
M27	11.20	23.80	12.60	2316.18	
REEMPLAZO ARENA 20%					
M28	6.80	19.20	12.40	2279.41	2267.16
M29	11.20	23.60	12.40	2279.41	
M30	11.40	23.60	12.20	2242.65	
REEMPLAZO ARENA 30%					
M31	11.40	23.40	12.00	2205.88	2169.12
M32	11.50	23.10	11.60	2132.35	
M33	11.40	23.20	11.80	2169.12	
REEMPLAZO ARENA 55%					
M34	11.40	22.70	11.30	2077.21	2071.08
M35	11.70	23.00	11.30	2077.21	
M36	11.40	22.60	11.20	2058.82	

*Tabla 26. Densidad del hormigón fresco  $f'_c=210$  Kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"					
<b>REALIZADO:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALL				
<b>FECHA:</b>	05/12/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO $f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ CON CATALIZADOR AGOTADO					
<b>NORMA:</b>	NTE INEN 1-579		<b>VOLUMEN DEL MOLDE:</b>	0.00544	m <sup>3</sup>
PROBETA #	PESO CILINDRO	H° + CILINDRO	PESO H°	DENSIDAD H°	DENSIDAD PROMEDIO
REEMPLAZO CEMENTO 5%					
M37	11.40	24.00	12.60	2316.18	2328.43
M38	11.40	24.00	12.60	2316.18	
M39	11.40	24.20	12.80	2352.94	
REEMPLAZO CEMENTO 10%					
M40	11.40	24.00	12.60	2316.18	2334.56
M41	11.20	23.90	12.70	2334.56	
M42	9.00	21.80	12.80	2352.94	
REEMPLAZO CEMENTO 20%					
M43	11.60	23.90	12.30	2261.03	2297.8
M44	11.40	24.00	12.60	2316.18	
M45	11.40	24.00	12.60	2316.18	
REEMPLAZO CEMENTO 30%					
M46	6.80	19.30	12.50	2297.79	2316.18
M47	11.40	24.10	12.70	2334.56	
M48	11.40	24.00	12.60	2316.18	
REEMPLAZO CEMENTO 55%					
M49	11.40	23.80	12.40	2279.41	2267.16
M50	11.60	23.80	12.20	2242.65	
M51	11.40	23.80	12.40	2279.41	

**Tabla 27.** Densidad del hormigón fresco  $f'_c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento

**Fuente:** Fuente propia



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"					
<b>REALIZADO:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA				
<b>FECHA:</b>	05/12/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES FICM - UTA		
DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ CON CATALIZADOR AGOTADO					
<b>NORMA:</b>	NTE INEN 1-579		<b>VOLUMEN DEL MOLDE:</b>		0.00544 m <sup>3</sup>
PROBETA #	PESO CILINDRO	H° + CILINDRO	PESO H°	DENSIDAD H°	DENSIDAD PROMEDIO
REEMPLAZO ARENA 5%					
M52	11.00	23.50	12.50	2297.79	2303.92
M53	11.60	24.00	12.40	2279.41	
M54	11.40	24.10	12.70	2334.56	
REEMPLAZO ARENA 10%					
M55	11.40	23.80	12.40	2279.41	2279.41
M56	11.60	24.00	12.40	2279.41	
M57	11.40	23.80	12.40	2279.41	
REEMPLAZO ARENA 20%					
M58	11.60	23.70	12.10	2224.26	2248.77
M59	11.40	23.70	12.30	2261.03	
M60	11.40	23.70	12.30	2261.03	
REEMPLAZO ARENA 30%					
M61	11.60	23.40	11.80	2169.12	2150.74
M62	11.40	23.00	11.60	2132.35	
M63	11.40	23.10	11.70	2150.74	
REEMPLAZO ARENA 55%					
M64	11.40	22.50	11.10	2040.44	2034.31
M65	11.60	22.60	11.00	2022.06	
M66	11.40	22.50	11.10	2040.44	

**Tabla 28.** Densidad del hormigón fresco  $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia

#### 4.1.6 Peso específico del hormigón endurecido a los 28 días de edad

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"			
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA		
<b>FECHA:</b>	27/12/2015	<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO
DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO (MUESTRAS PATRÓN)			
<b>VOLUMEN CILINDRO:</b>	0.00544	<b>NORMA:</b>	ASTM C39
PROBETA #	PESO CILINDRO	DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	DENSIDAD PROMEDIO (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>f'c = 210 Kg/cm<sup>2</sup></b>			
M1	12.120	2227.94	2250.92
M2	12.300	2261.03	
M3	12.315	2263.79	
<b>f'c = 280 Kg/cm<sup>2</sup></b>			
M4	12.345	2269.3	2272.98
M5	12.185	2239.89	
M6	12.565	2309.74	

Tabla 29. Densidad del hormigón endurecido (muestras patrón)

Fuente: Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"			
<b>REALIZADO:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA	<b>FECHA:</b>	01/01/2016
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO		
DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO f'c=210 Kg/cm <sup>2</sup> CON CATALIZADOR AGOTADO			
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>VOLUMEN PROBETA:</b>	0.00544 m <sup>3</sup>
PROBETA #	P. PROBETA	DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	DENSIDAD PROM. Kg/m <sup>3</sup>
<b>REEMPLAZO CEMENTO 5%</b>			
M7	12.625	2320.77	2303.61
M8	12.555	2307.90	
M9	12.415	2282.17	
<b>REEMPLAZO CEMENTO 10%</b>			
M10	12.585	2313.42	2313.11
M11	12.545	2306.07	
M12	12.620	2319.85	
<b>REEMPLAZO CEMENTO 20%</b>			
M13	12.430	2284.93	2302.39
M14	12.520	2301.47	
M15	12.625	2320.77	
<b>REEMPLAZO CEMENTO 30%</b>			
M16	12.180	2238.97	2245.71
M17	12.330	2266.54	
M18	12.140	2231.62	
<b>REEMPLAZO CEMENTO 55%</b>			
M19	12.060	2216.91	2224.88
M20	12.175	2238.05	
M21	12.075	2219.67	

Tabla 30. Densidad del hormigón endurecido f'c=210 kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo del cemento

Fuente: Fuente propia

<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</b>				
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</b>				
<b>"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"</b>				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA	<b>FECHA:</b>	02/01/2016	
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO			
<b>DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO <math>f'_c=210</math> Kg/cm<sup>2</sup> CON CATALIZADOR AGOTADO</b>				
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>VOLUMEN PROBETA:</b>	0.00544	m <sup>3</sup>
<b>PROBETA #</b>	<b>PESO PROBETA</b>	<b>DENSIDAD Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>DENSIDAD PROM. Kg/m<sup>3</sup></b>	
<b>REEMPLAZO ARENA 5%</b>				
M22	12.175	2238.05	2270.53	
M23	12.535	2304.23		
M24	12.345	2269.30		
<b>REEMPLAZO ARENA 10%</b>				
M25	12.070	2218.75	2240.81	
M26	12.285	2258.27		
M27	12.215	2245.40		
<b>REEMPLAZO ARENA 20%</b>				
M28	11.920	2191.18	2206.50	
M29	12.140	2231.62		
M30	11.950	2196.69		
<b>REEMPLAZO ARENA 30%</b>				
M31	11.520	2117.65	2114.89	
M32	11.425	2100.18		
M33	11.570	2126.84		
<b>REEMPLAZO ARENA 55%</b>				
M34	10.890	2001.84	2001.53	
M35	10.915	2006.43		
M36	10.860	1996.32		

**Tabla 31.** Densidad del hormigón endurecido  $f'_c=210$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
**Fuente:** Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA		<b>FECHA:</b>	02/01/2016
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO			
DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO $f'_c=280$ Kg/cm <sup>2</sup> CON CATALIZADOR AGOTADO				
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>VOLUMEN PROBETA:</b>	0.00544	m <sup>3</sup>
<b>PROBETA #</b>	<b>PESO PROBETA</b>	<b>DENSIDAD Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>DENSIDAD PROM. Kg/m<sup>3</sup></b>	
REEMPLAZO CEMENTO 5%				
M37	12.255	2252.76	2250.31	
M38	12.225	2247.24		
M39	12.245	2250.92		
REEMPLAZO CEMENTO 10%				
M40	12.460	2290.44	2275.12	
M41	12.370	2273.90		
M42	12.300	2261.03		
REEMPLAZO CEMENTO 20%				
M43	12.290	2259.19	2254.29	
M44	12.245	2250.92		
M45	12.255	2252.76		
REEMPLAZO CEMENTO 30%				
M46	12.340	2268.38	2246.32	
M47	12.000	2205.88		
M48	12.320	2264.71		
REEMPLAZO CEMENTO 55%				
M49	12.015	2208.64	2215.07	
M50	12.010	2207.72		
M51	12.125	2228.86		

**Tabla 32.** Densidad del hormigón endurecido  $f'_c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"				
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA	<b>FECHA:</b>	02/01/2016	
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO			
DENSIDAD DEL HORMIGÓN ENDURECIDO $f'_c=280$ Kg/cm <sup>2</sup> CON CATALIZADOR AGOTADO				
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>VOLUMEN PROBETA:</b>	0.00544	m <sup>3</sup>
PROBETA #	PESO PROBETA	DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	DENSIDAD PROM. Kg/m <sup>3</sup>	
REEMPLAZO ARENA 5%				
M52	12.130	2229.78	2240.81	
M53	12.235	2249.08		
M54	12.205	2243.57		
REEMPLAZO ARENA 10%				
M55	12.300	2261.03	2264.15	
M56	12.330	2266.54		
M57	12.321	2264.89		
REEMPLAZO ARENA 20%				
M58	11.965	2199.45	2194.85	
M59	11.910	2189.34		
M60	11.945	2195.77		
REEMPLAZO ARENA 30%				
M61	11.450	2104.78	2110.29	
M62	11.510	2115.81		
M63	11.480	2110.29		
REEMPLAZO ARENA 55%				
M64	10.765	1978.86	2045.04	
M65	10.790	1983.46		
M66	11.820	2172.79		

**Tabla 33.** Densidad del hormigón endurecido  $f'_c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
**Fuente:** Fuente propia

#### 4.1.7 Resistencia a la compresión del hormigón endurecido a los 28 días de edad

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"			
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL	<b>FECHA:</b>	01/01/2016
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO		
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON CATALIZADOR AGOTADO (28 DIAS)			
<b>NORMA:</b>	ASTM C39		
PROBETA #	RESISTENCIA (Kg/cm <sup>2</sup> )	%	RESISTENCIA PROM. (Kg/cm <sup>2</sup> )
<b>f<sub>c</sub> =</b>		<b>210</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>
M1	208.35	99.21%	209.89
M2	210.04	100.02%	
M3	211.28	100.61%	
<b>f<sub>c</sub> =</b>		<b>280</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>
M4	275.05	98.23%	280.05
M5	280.05	100.02%	
M6	285.05	101.80%	

Tabla 34. Resistencia a la compresión del hormigón de muestras patrón

Fuente: Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"					
<b>REALIZADO:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL		<b>FECHA:</b>	01/01/2016	
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO				
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON CATALIZADOR AGOTADO					
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>EDAD=</b>	28 DIAS	<b>f<sub>c</sub>=</b>	210 Kg/cm <sup>2</sup>
PROBETA #	RESISTENCIA (Kg/cm <sup>2</sup> )	%		RESISTENCIA PROM. (Kg/cm <sup>2</sup> )	
<b>REEMPLAZO CEMENTO 5%</b>					
M7	76.20	36.29%		80.55	
M8	85.05	40.50%			
M9	80.40	38.29%			
<b>REEMPLAZO CEMENTO 10%</b>					
M10	79.05	37.64%		82.4	
M11	85.20	40.57%			
M12	82.95	39.50%			
<b>REEMPLAZO CEMENTO 20%</b>					
M13	63.90	30.43%		61.35	
M14	60.00	28.57%			
M15	60.15	28.64%			
<b>REEMPLAZO CEMENTO 30%</b>					
M16	39.00	18.57%		40.35	
M17	45.45	21.64%			
M18	36.60	17.43%			
<b>REEMPLAZO CEMENTO 55%</b>					
M19	17.10	8.14%		16.95	
M20	16.80	8.00%			
M21	16.95	8.07%			

Tabla 35. Resistencia del hormigón  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento

Fuente: Fuente propia

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"						
REALIZADO POR:	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			FECHA:	02/01/2016	
SITIO:	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO					
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON CATALIZADOR AGOTADO						
NORMA:	ASTM C39	EDAD=	28 DIAS	f'c=	210	Kg/cm <sup>2</sup>
PROBETA #	RESISTENCIA (Kg/cm <sup>2</sup> )		%		RESISTENCIA PROM. (Kg/cm <sup>2</sup> )	
REEMPLAZO ARENA 5%						
M22	72.15		34.36%		72.55	
M23	69.30		33.00%			
M24	76.20		36.29%			
REEMPLAZO ARENA 10%						
M25	61.50		29.29%		60.90	
M26	55.50		26.43%			
M27	65.70		31.29%			
REEMPLAZO ARENA 20%						
M28	57.45		27.36%		60.40	
M29	63.30		30.14%			
M30	60.45		28.79%			
REEMPLAZO ARENA 30%						
M31	28.50		13.57%		29.55	
M32	31.80		15.14%			
M33	28.35		13.50%			
REEMPLAZO ARENA 55%						
M34	17.850		8.50%		17.80	
M35	18.450		8.79%			
M36	17.100		8.14%			

*Tabla 36. Resistencia del hormigón  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
Fuente: Fuente propia*

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"						
<b>REALIZADO POR:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			<b>FECHA:</b>	02/01/2016	
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO					
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON CATALIZADOR AGOTADO						
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>EDAD=</b>	28 DIAS	<b>f'c=</b>	280	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>PROBETA #</b>	<b>RESISTENCIA (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>		<b>RESISTENCIA PROM. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
REEMPLAZO CEMENTO 5%						
M37	61.20	21.86%		63.98		
M38	66.75	23.84%				
M39	63.98	22.85%				
REEMPLAZO CEMENTO 10%						
M40	62.85	22.45%		61.00		
M41	60.45	21.59%				
M42	59.70	21.32%				
REEMPLAZO CEMENTO 20%						
M43	43.65	15.59%		45.23		
M44	46.80	16.71%				
M45	45.23	16.15%				
REEMPLAZO CEMENTO 30%						
M46	39.75	14.20%		39.53		
M47	39.30	14.04%				
M48	39.53	14.12%				
REEMPLAZO CEMENTO 55%						
M49	15.300	5.46%		14.63		
M50	13.950	4.98%				
M51	14.625	5.22%				

*Tabla 37. Resistencia del hormigón  $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo del cemento  
Fuente: Fuente propia*



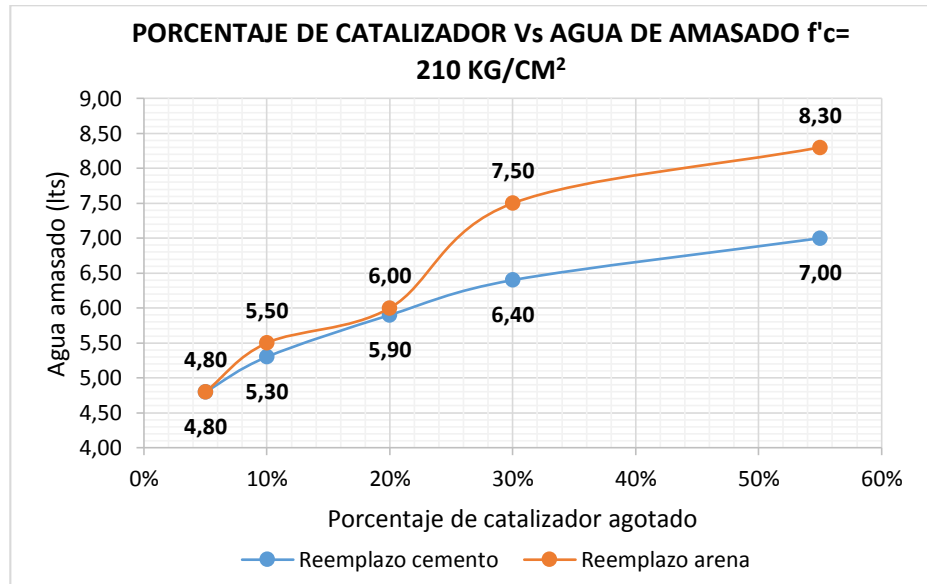
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
"LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND ADICIONANDO CATALIZADOR AGOTADO DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO"						
<b>REALIZADO:</b>	LOURDES GABRIELA PEÑAFIEL VALLA			<b>FECHA:</b>	02/01/2016	
<b>SITIO:</b>	LABORATORIO DE ECOHORMIGONES - AMBATO					
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON CATALIZADOR AGOTADO						
<b>NORMA:</b>	ASTM C39	<b>EDAD=</b>	28 DIAS	<b>f'c=</b>	280	Kg/cm <sup>2</sup>
<b>PROBETA #</b>	<b>RESISTENCIA (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		<b>%</b>	<b>RESISTENCIA PROM. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
REEMPLAZO ARENA 5%						
M52	81.45		29.09%	76.43		
M53	71.40		25.50%			
M54	76.43		27.29%			
REEMPLAZO ARENA 10%						
M55	89.25		31.88%	86.18		
M56	83.10		29.68%			
M57	86.18		30.78%			
REEMPLAZO ARENA 20%						
M58	76.05		27.16%	80.10		
M59	84.15		30.05%			
M60	80.10		28.61%			
REEMPLAZO ARENA 30%						
M61	44.10		15.75%	42.08		
M62	40.05		14.30%			
M63	42.08		15.03%			
REEMPLAZO ARENA 55%						
M64	18.30		6.54%	18.08		
M65	17.85		6.38%			
M66	18.08		6.46%			

**Tabla 38.** Resistencia del hormigón  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
**Fuente:** Fuente propia

## 4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

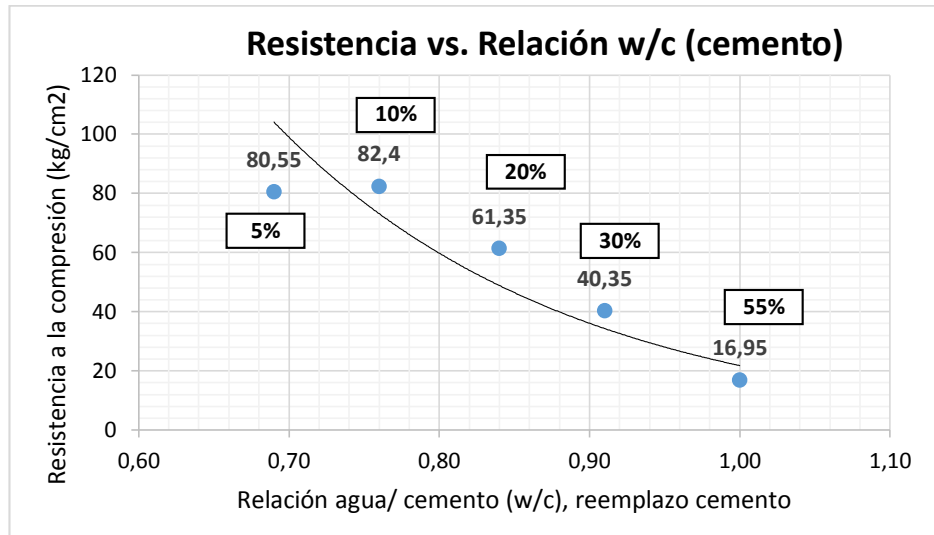
A continuación se muestra la interpretación gráfica de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las diferentes probetas de hormigón elaborado con materiales convencionales y de las probetas elaboradas con catalizador agotado en diferentes porcentajes.

### 4.2.1 Propiedades mecánicas del hormigón fresco



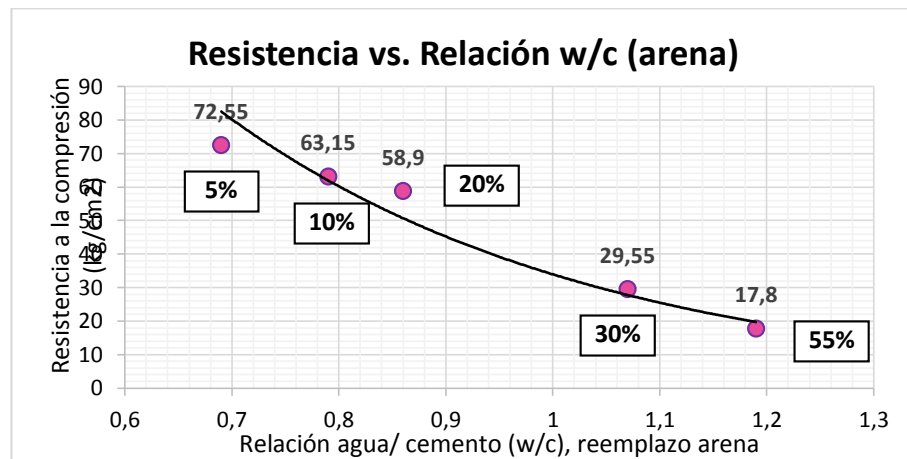
**Figura 12.** Porcentaje de catalizador vs. Agua de amasado, reemplazo cemento y arena (210 kg/cm<sup>2</sup>)  
**Fuente:** Fuente propia

Como se puede observar en la figura 12, las líneas de color indican la cantidad de agua utilizada durante el proceso de amasado de las muestras de hormigón adicionadas catalizador agotado. La curva del hormigón al cual se le retiró un porcentaje de cemento y se lo sustituyó con catalizador agotado indica una pendiente moderada, es decir que la variación de agua es constante con cada porcentaje del nuevo material. La curva de reemplazo de la arena posee valores de agua de amasado mayores a las del cemento, además existe una variación importante entre los porcentajes del 20 y 30%.



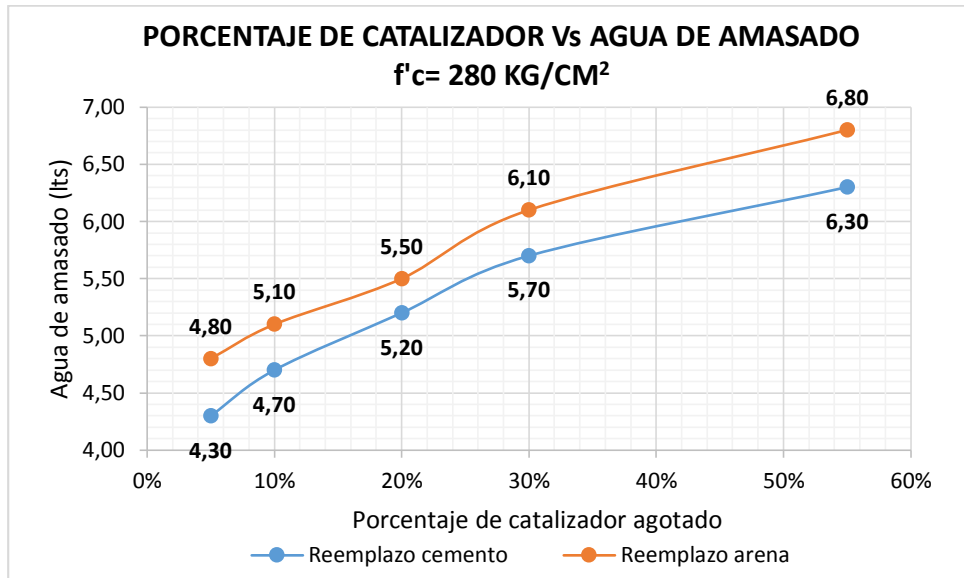
**Figura 13.** Resistencia a la compresión vs. Relación w/c,  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>. Reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia

La figura 13 indica la relación que existe entre la resistencia a la compresión del hormigón vs. La relación agua / cemento (w/c). Como se indica en la figura superior, la resistencia a la compresión del hormigón es inversamente proporcional al incremento de agua de amasado. A mayor agua, menor resistencia.



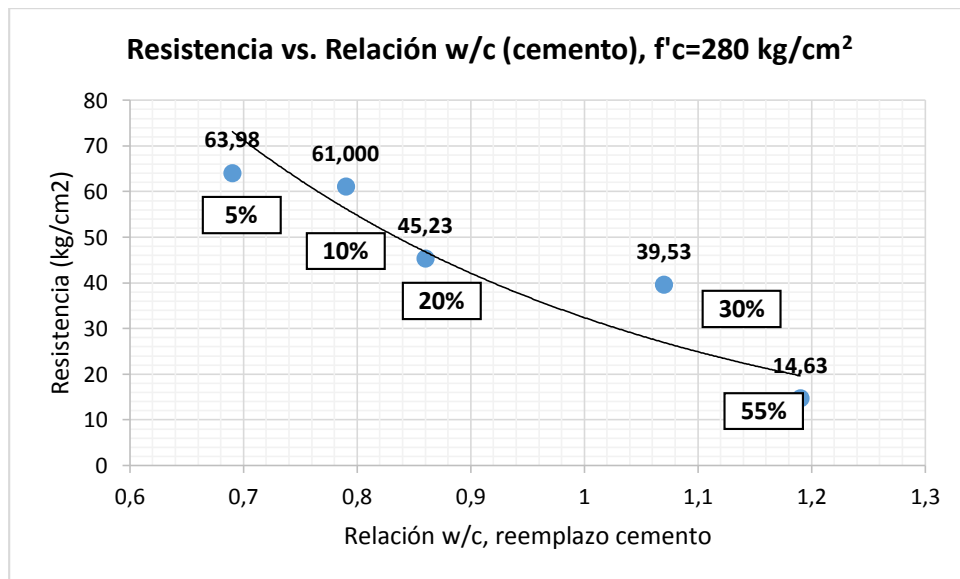
**Figura 14.** Resistencia a la compresión vs. Relación w/c,  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>. Reemplazo arena  
**Fuente:** Fuente propia

La figura 14, al igual que la figura 13 indica la relación que existe entre la resistencia a la compresión del hormigón versus la relación agua / cemento (w/c). A mayor agua, menor resistencia. Sin embargo las resistencias obtenidas por los cilindros reemplazados el material fino por catalizador agotado, presentan resistencias menores a los hormigones en los cuales se retiró parte del cemento.

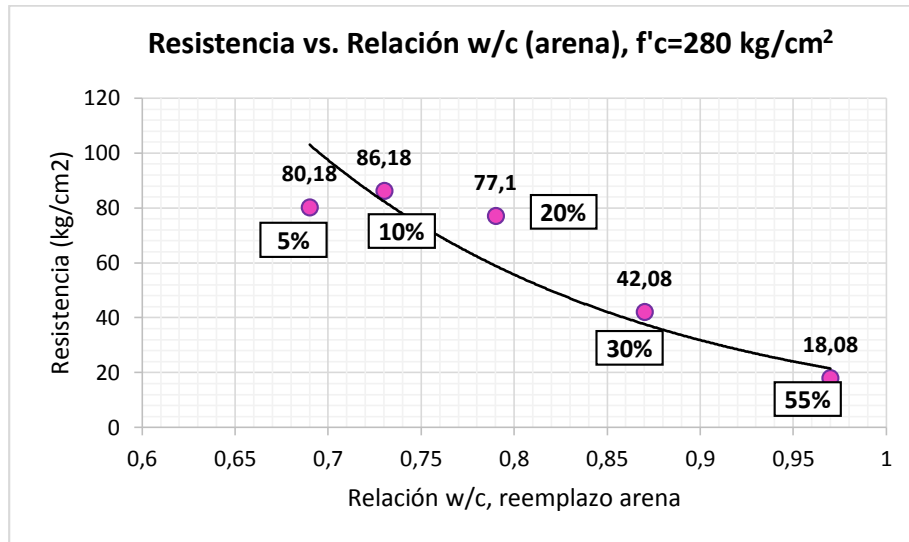


**Figura 15.** Porcentaje de catalizador vs. Agua de amasado, reemplazo cemento y arena (280 kg/cm<sup>2</sup>)  
**Fuente:** Fuente propia

La figura 15 muestra dos curvas que representan la cantidad de agua de amasado en litros que se utilizaron para elaborar las muestras de hormigón de 280 kg/cm<sup>2</sup>. Como se observa arriba, las curvas poseen pendientes suavizadas, lo que significa que las variaciones entre cada porcentaje de catalizador agotado y la cantidad de agua utilizada son cercanas para ambos casos. Además se indica que a mayor cantidad de catalizador agotado empleado en el hormigón, mayor cantidad de agua de amasado se requiere.



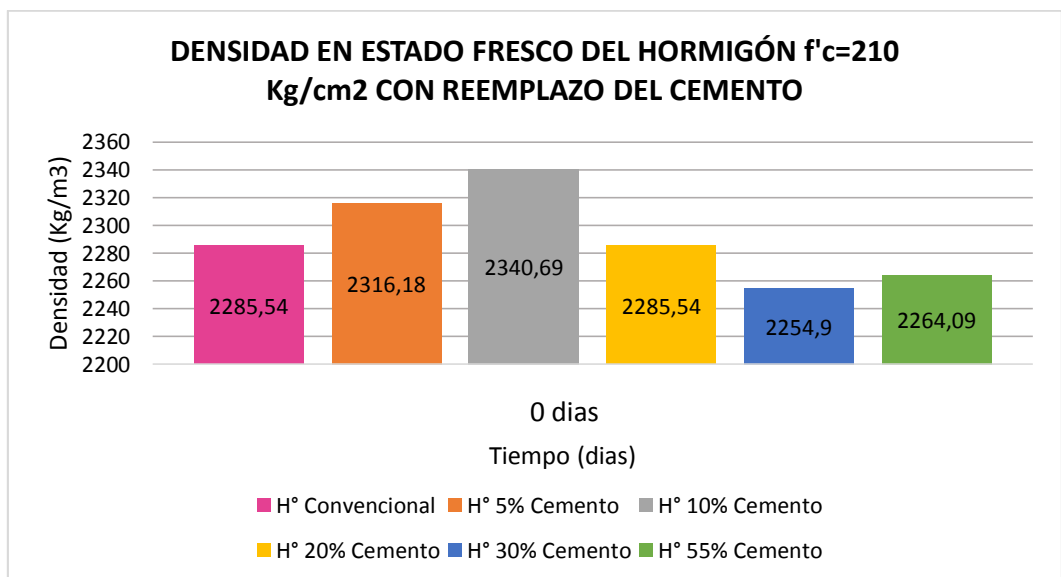
**Figura 16.** Resistencia a la compresión vs. Relación w/c, f'c=280 kg/cm<sup>2</sup>. Reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia



**Figura 17.** Resistencia a la compresión vs. Relación w/c, f'c=280 kg/cm2. Reemplazo arena  
**Fuente:** Fuente propia

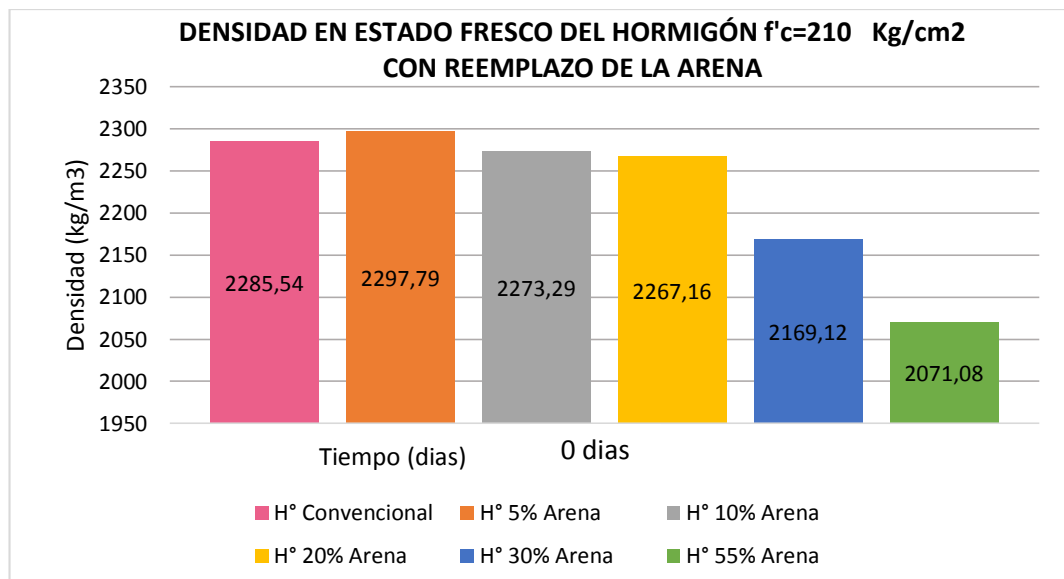
Las figuras 16 y 17 indican la relación existente entre la resistencia a la compresión del hormigón y la relación agua / cemento (w/c). En los dos casos, tanto en el reemplazo del cemento como el de la arena, la resistencia a la compresión del hormigón es inversamente proporcional a la relación agua/cemento. La resistencia alcanzada por las muestras de hormigón en las cuales se reemplazó la arena es superior a las resistencias alcanzadas por las muestras a las cuales se le retiró porcentajes de cemento.

#### 4.2.2 Análisis de las densidades en estado fresco de las probetas



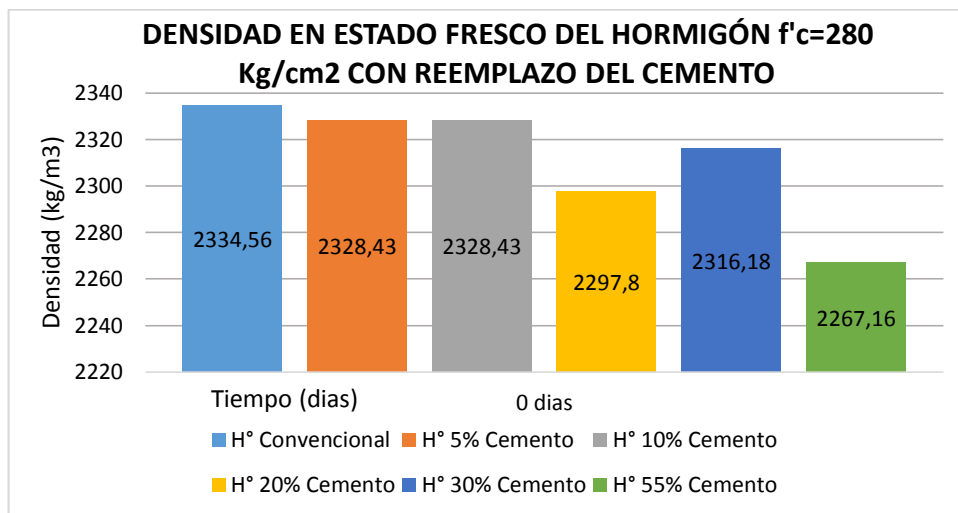
**Figura 18.** Densidad en estado fresco, Hormigón f'c=210 kg/cm², reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia

Como se puede ver en la figura No. 18, la probeta de hormigón que mayor densidad adquirió es la del hormigón mezclado con 10% de catalizador en reemplazo del cemento. La probeta con 5% de catalizador agotado posee mayor resistencia que la muestra patrón. A su vez, la menor densidad adquirida representa al hormigón con reemplazo del cemento en un porcentaje del 30%. Los hormigones con reemplazo de 20% y 55% poseen mayor densidad fresca que el hormigón de 30%. En conclusión se puede observar que a medida que incrementa el porcentaje de catalizador como material constituyente del hormigón, éste disminuye su densidad en estado fresco.



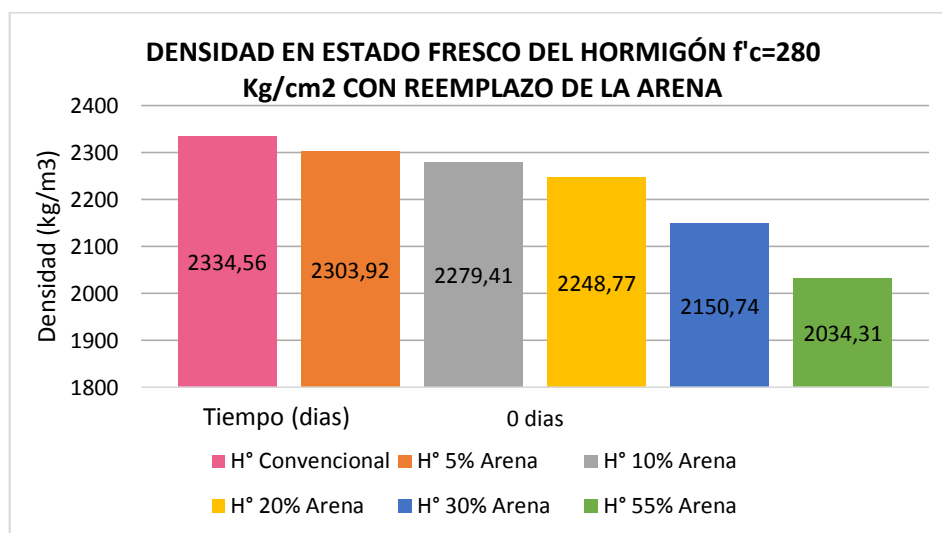
**Figura 19.** Densidad en estado fresco, Hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo de la arena  
**Fuente:** Fuente propia

Como se puede ver en la figura No.19, la probeta de hormigón que mayor densidad adquirió es la del hormigón mezclado con 5% de catalizador en reemplazo de la arena, sin embargo las densidades entre éste porcentaje y la densidad del hormigón convencional no dista notablemente. Las probetas con reemplazo de catalizador agotado del 10 y 20% no disminuyen considerablemente su densidad con respecto a la probeta patrón, mientras que el 30 y 55% de catalizador agotado si presentan una disminución mayor respecto a la probeta patrón. En conclusión se puede observar que a medida que incrementa el porcentaje de catalizador como material constituyente del hormigón en reemplazo de la arena, éste disminuye su densidad en estado fresco progresivamente.



**Figura 20.** Densidad en estado fresco, Hormigón  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia

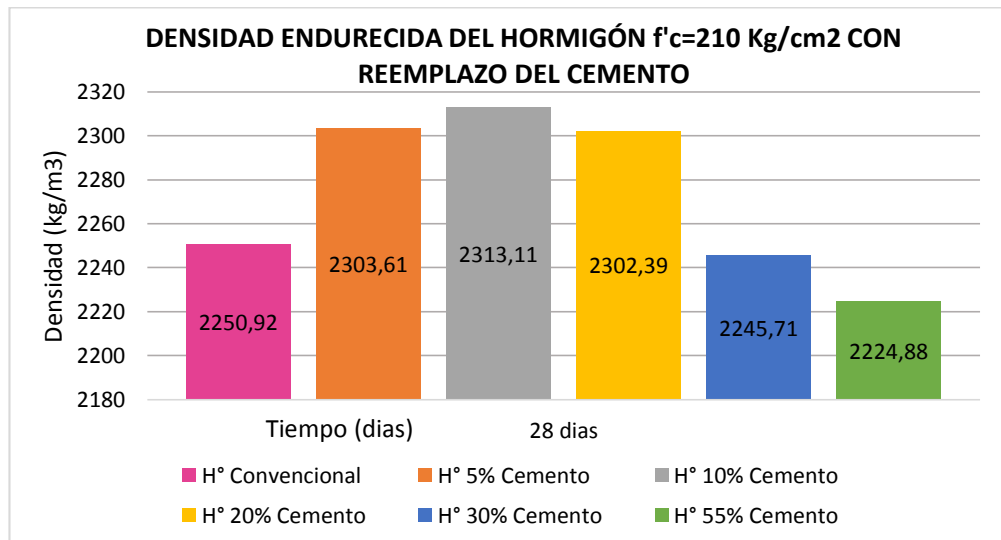
Como se puede ver en la figura 20, la probeta patrón es la que mayor densidad adquirió con respecto a las demás, además se puede observar que las densidades se mantienen en valores similares entre sí. En conclusión, es notorio que a medida que incrementa el porcentaje de catalizador como material constituyente del hormigón en reemplazo del cemento, éste disminuye su densidad en estado fresco progresivamente.



**Figura 21.** Densidad en estado fresco, Hormigón  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
**Fuente:** Fuente propia

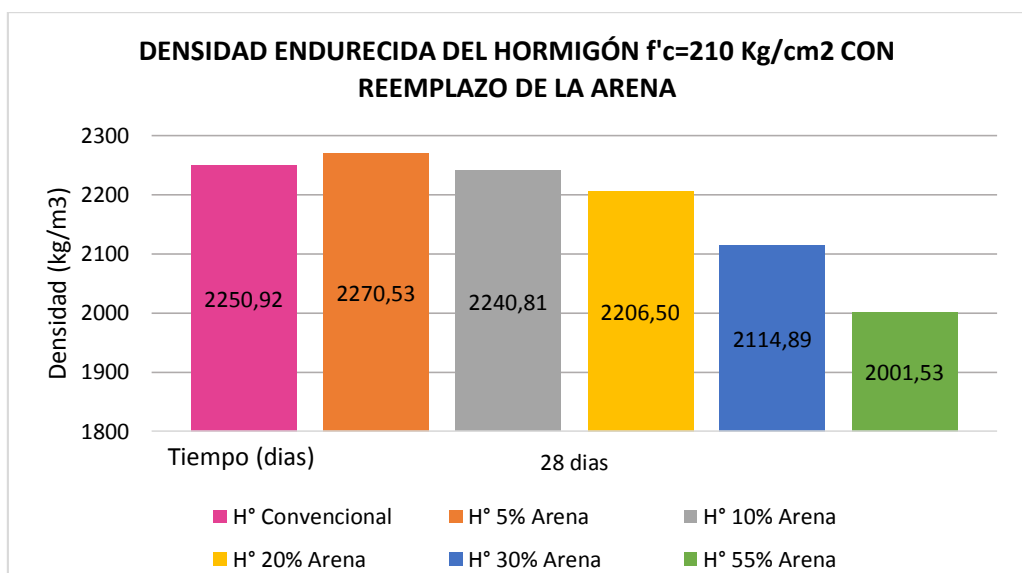
Como se puede ver en la figura 21, la probeta patrón es la que mayor densidad adquirió con respecto a las demás, y además, se visualiza que las densidades disminuyen de forma gradual a medida que el porcentaje de catalizador como sustituyente de la arena aumenta.

### 4.2.3 Peso específico endurecido (densidad endurecida) del hormigón a los 28 días de edad



**Figura 22.** Densidad endurecida, Hormigón  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo del cemento  
Fuente: Fuente propia

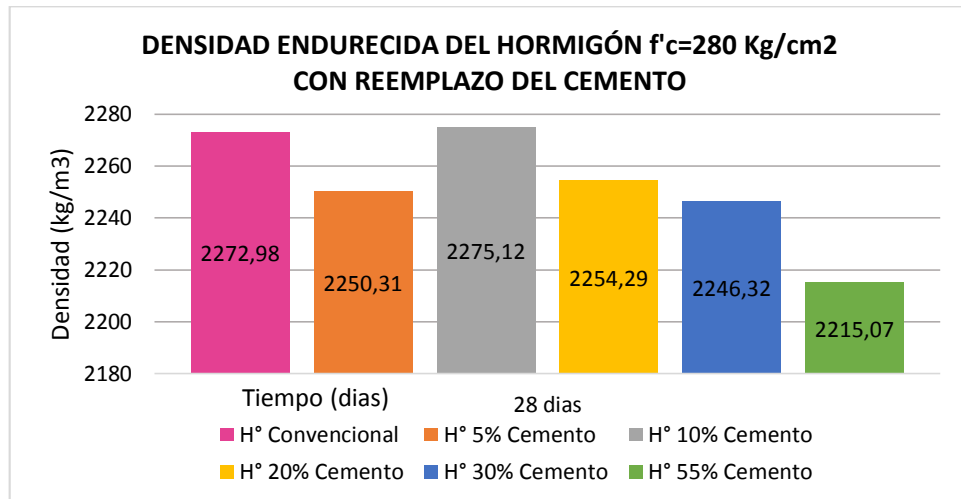
Como se puede ver en la figura No.22, la mayor densidad adquirida a los 28 días de edad, corresponde a la probeta con 10% de catalizador como reemplazo del cemento. Las probetas con 5, 10, 20% alcanzan un mayor peso específico endurecido que la muestra patrón, y las probetas con mayor porcentaje de catalizador poseen una densidad menor al hormigón convencional. En conclusión, el peso específico endurecido va creciendo hasta el 10% de reemplazo y luego disminuye gradualmente.



**Figura 23.** Densidad endurecida, Hormigón  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
Fuente: Fuente propia

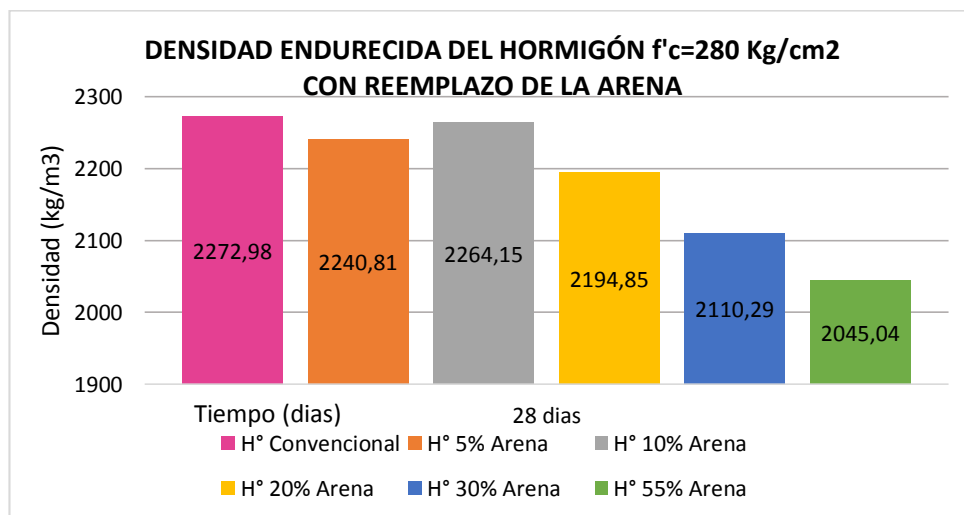


Como se puede ver en la figura 23, la probeta patrón con 5% de catalizador como reemplazo de la arena adquiere mayor densidad con respecto a las demás probetas. También se interpreta en el cuadro superior que la densidad va decreciendo mientras mayor cantidad de catalizador se ha aumentado sustituyendo a la arena.



**Figura 24.** Densidad endurecida, Hormigón  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo del cemento  
**Fuente:** Fuente propia

Tal como se muestra en la figura No. 24, las densidades endurecidas de las muestras patrón están muy cerca que las densidades adquiridas por las muestras con 10% de catalizador en reemplazo del cemento. Las demás densidades se encuentran dentro de un rango cercano de valores entre sí. La única muestra que ha disminuido considerablemente su peso específico endurecido ha sido la que contiene 55% de catalizador agotado.



**Figura 25.** Densidad endurecida, Hormigón  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo de la arena  
**Fuente:** Fuente propia

Tal como se muestra en la figura No. 25, el hormigón convencional ha adquirido la mayor densidad con respecto a las demás muestras. La muestra que posee 10% de catalizador agotado continua a la muestra patrón en mayor peso específico. A medida que se incrementa el porcentaje de catalizador agotado como sustituto de la arena, menor es su densidad endurecida.

#### 4.2.4 Comparación entre densidades en estado fresco y endurecido

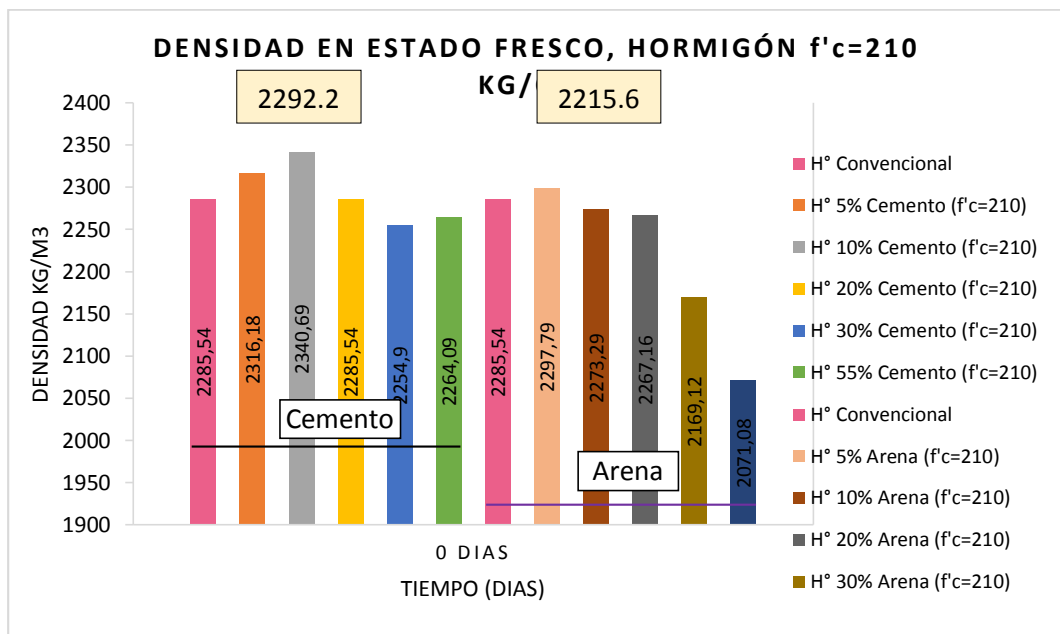


Figura 26. Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, f'c=210 kg/cm2.

Fuente: Fuente propia

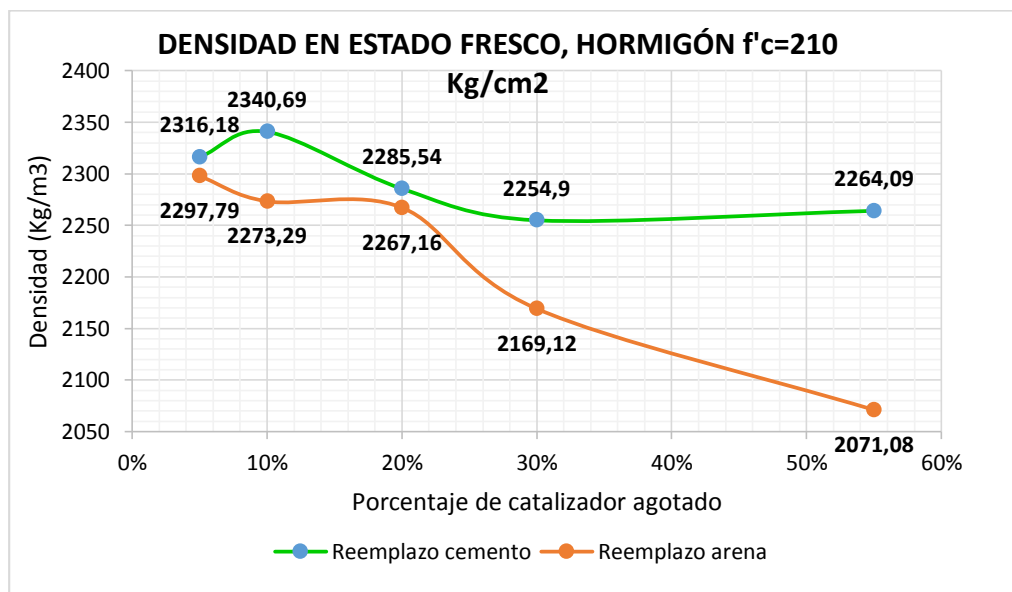
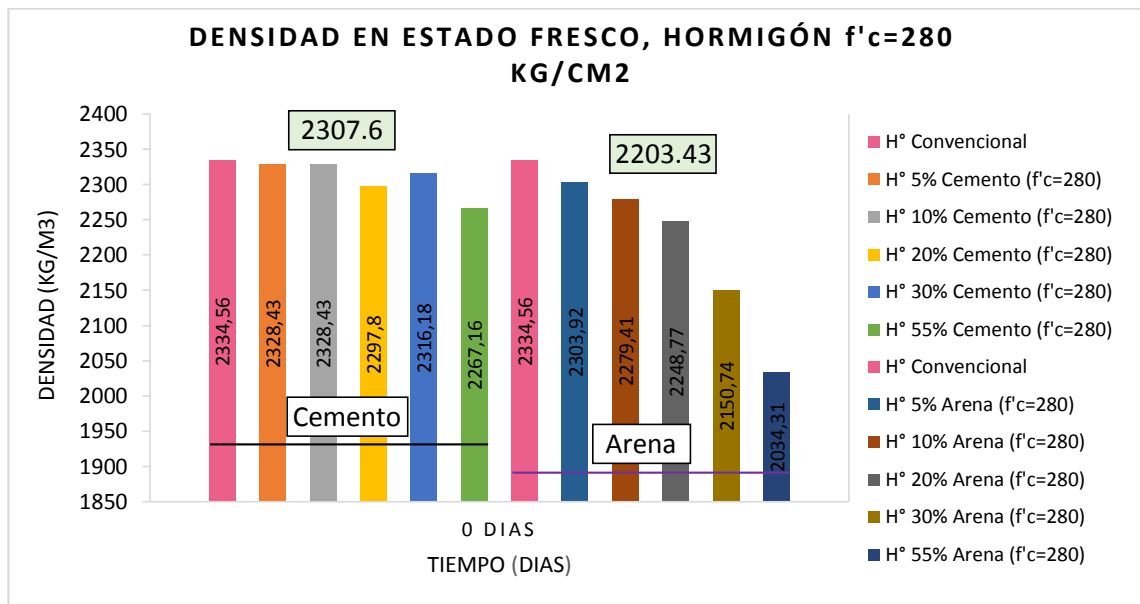


Figura 27. Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, f'c=210 kg/cm2.

Fuente: Fuente propia

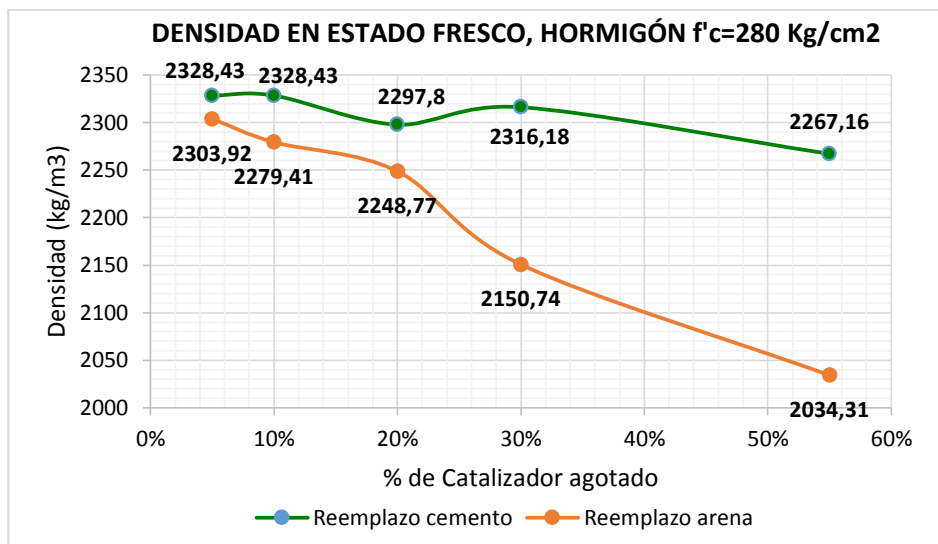
Las figuras 26 y 27 corresponden a una comparación entre las densidades en estado fresco de un hormigón de 210 Kg/cm<sup>2</sup> al cual se le ha adicionado catalizador agotado en diferentes proporciones. Nótese que la curva de color verde – correspondiente a hormigón adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento – posee variaciones poco distantes entre sí, resaltando el punto máximo en el porcentaje de 10% de catalizador, por lo que la curva construida a partir de esos datos posee pendientes suavizadas sin inflexiones bruscas. En contraste con la primera curva, la segunda de color naranja sí posee variaciones bastante notables, al punto que su curvatura decae bruscamente en el porcentaje máximo de catalizador agotado (55%). Como se puede visualizar en la figura 27, ambas curvas parecen poseer comportamientos contrarios, es decir, en apariencia son similares y valores van sentido contrario en cada punto.

De la figura 27 podemos percibir que la densidad del hormigón con catalizador agotado en reemplazo del cemento es superior a la densidad del hormigón en reemplazo de la arena por catalizador.



**Figura 28.** Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, f'c=280 kg/cm<sup>2</sup>.

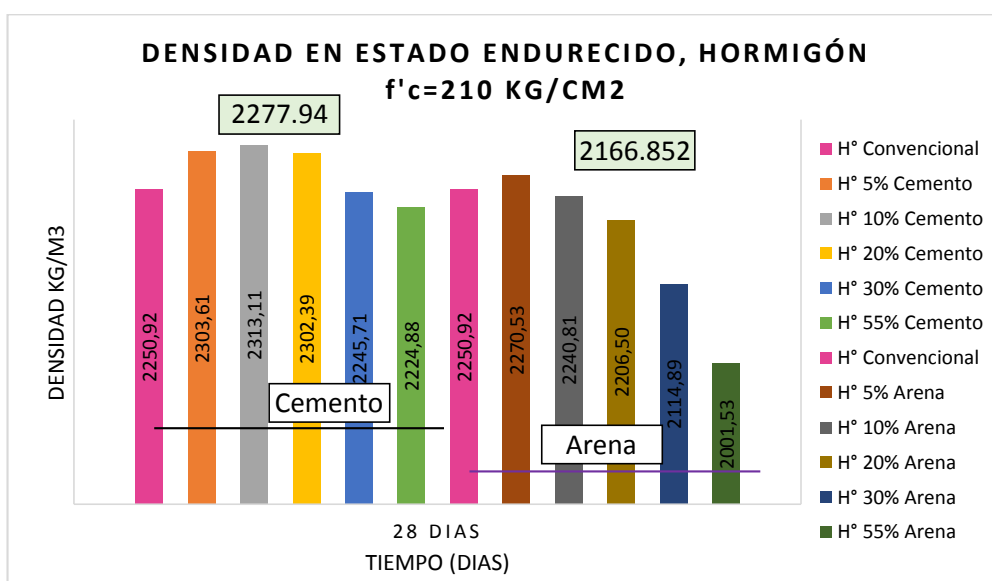
**Fuente:** Fuente propia



**Figura 29.** Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado fresco, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena,  $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$ .

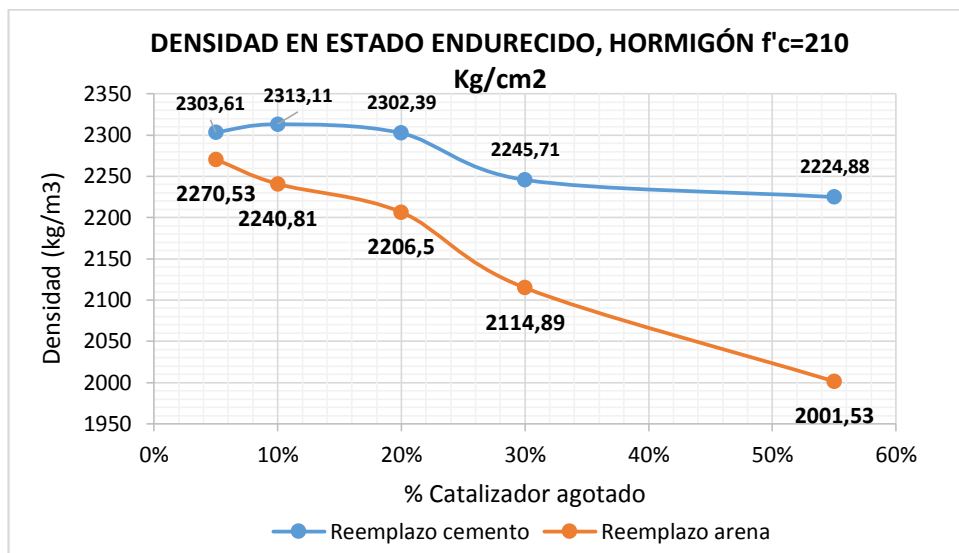
**Fuente:** Fuente propia

En la figura 29, al igual que la comparación anterior, los comportamientos entre las densidades del hormigón en estado fresco se presentan contrarias entre el reemplazo del cemento y la arena. La densidad del hormigón en estado fresco adicionado con catalizador agotado en reemplazo del cemento es mayor a la densidad al reemplazar la arena. Es notario el decremento de la curva de la arena cuando se incrementa la cantidad de catalizador agotado, mientras que en la curva del cemento su pendiente disminuye suavemente. Ambas curvas tienen comportamientos opuestos en cada punto de inflexión.



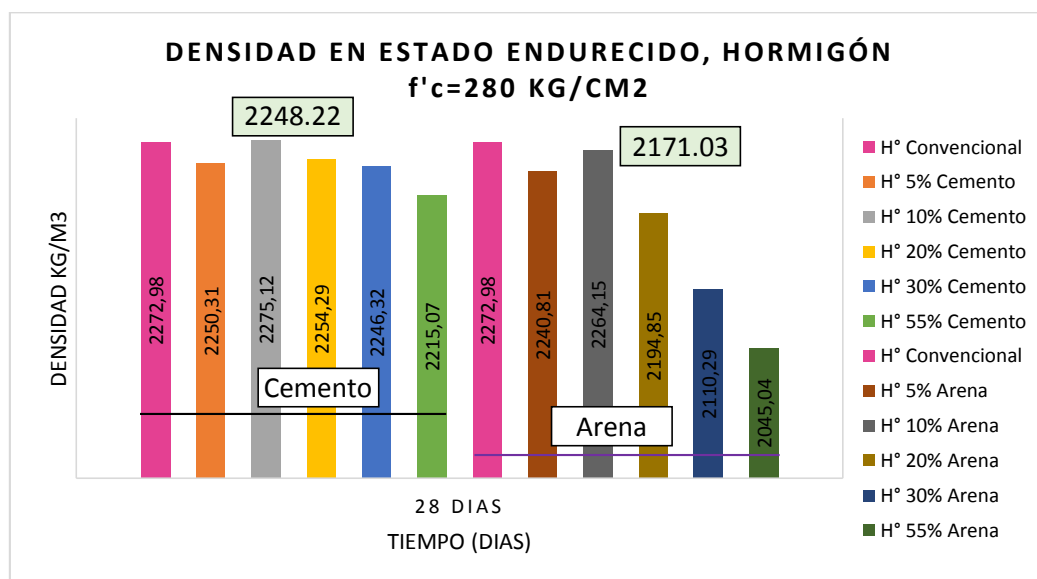
**Figura 30.** Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena,  $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Fuente:** Fuente propia

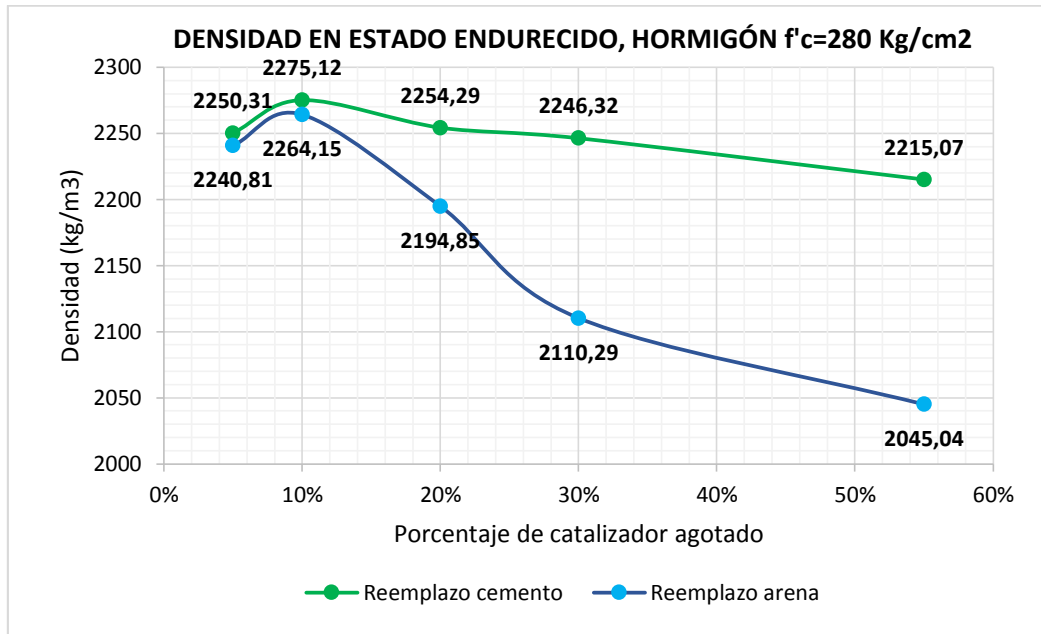


**Figura 31.** Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, f'c=210 kg/cm<sup>2</sup>.  
Fuente: Fuente propia

Las figuras 30 y 31 son una comparación entre las densidades en estado endurecido de un hormigón de 210 Kg/cm<sup>2</sup> al cual se le ha adicionado catalizador agotado en diferentes proporciones. Nótese que las curvas poseen puntos de inflexión más suavizados en comparación a las curvas del material en estado fresco. Estas gráficas poseen las mismas características que las anteriores, es decir que ambas son reflejo la una de la otra. La densidad más baja corresponde al 55% de catalizador agotado, sobre todo en el reemplazo de la arena este disminución es más evidente.



**Figura 32.** Primer grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena, f'c=280 kg/cm<sup>2</sup>.  
Fuente: Fuente propia

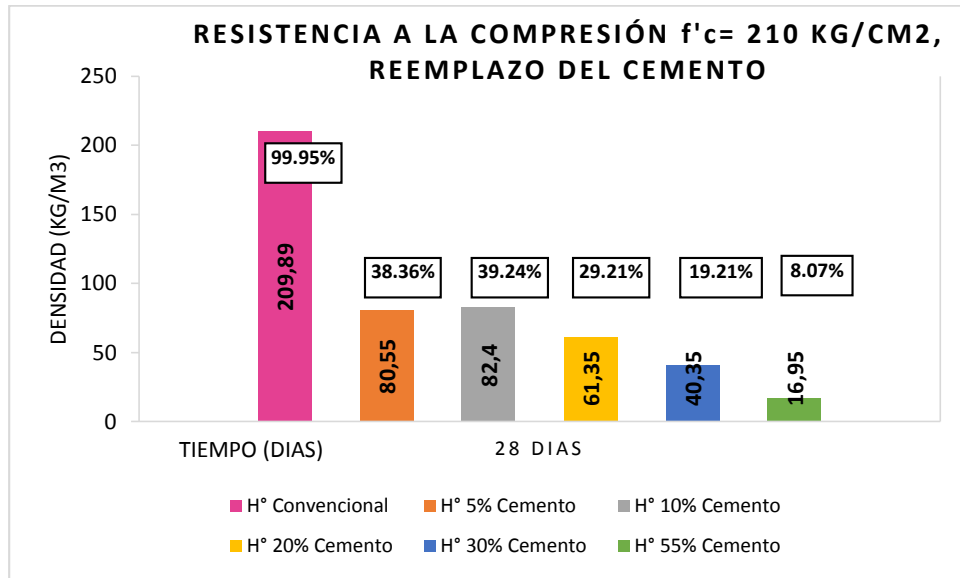


**Figura 33.** Segundo grafico comparativo de densidades del hormigón en estado endurecido, adicionado catalizador agotado en reemplazo del cemento y la arena,  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup>.  
**Fuente:** Fuente propia

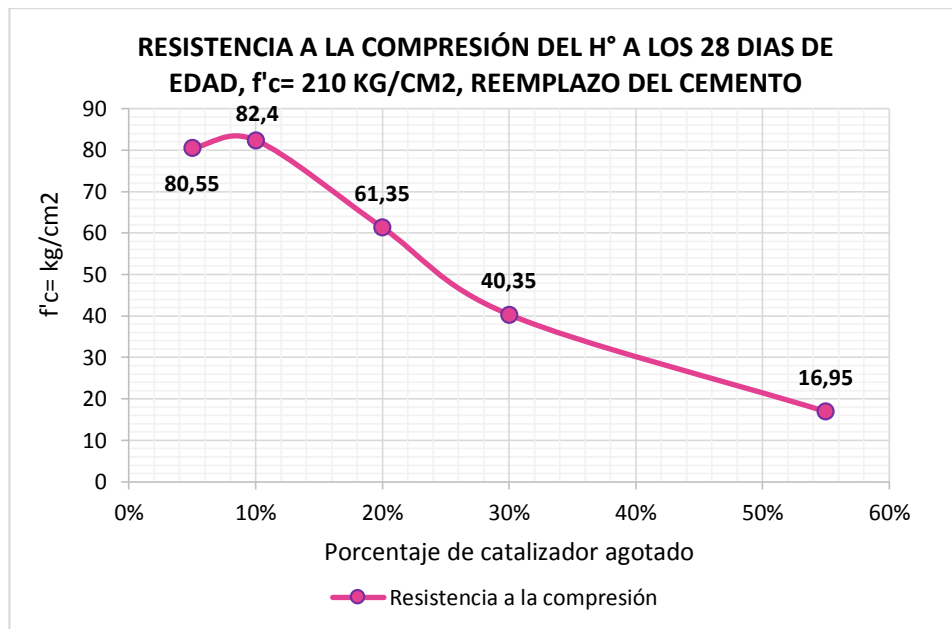
Las figuras 32 y 33 representan el comportamiento de las densidades en estado endurecido de un hormigón de 280 Kg/cm<sup>2</sup> al cual se le ha adicionado catalizador agotado en diferentes proporciones. Nótese que la curva del cemento se ha suavizado, lo que significa que las densidades alcanzadas durante el fraguado se encuentran en un rango de valores similares para cada porcentaje de catalizador. Por el contrario la curva que representa a la arena se va acentuando hacia abajo a medida que incrementa el porcentaje de catalizador, siendo el punto más alto de esta gráfica el 10% de catalizador, incluso superando al 5%.

#### **4.2.5 Resistencia a la compresión del hormigón adicionado con catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado**

En este apartado se describen gráficamente los resultados obtenidos durante los ensayos de compresión simple a las probetas de hormigón.

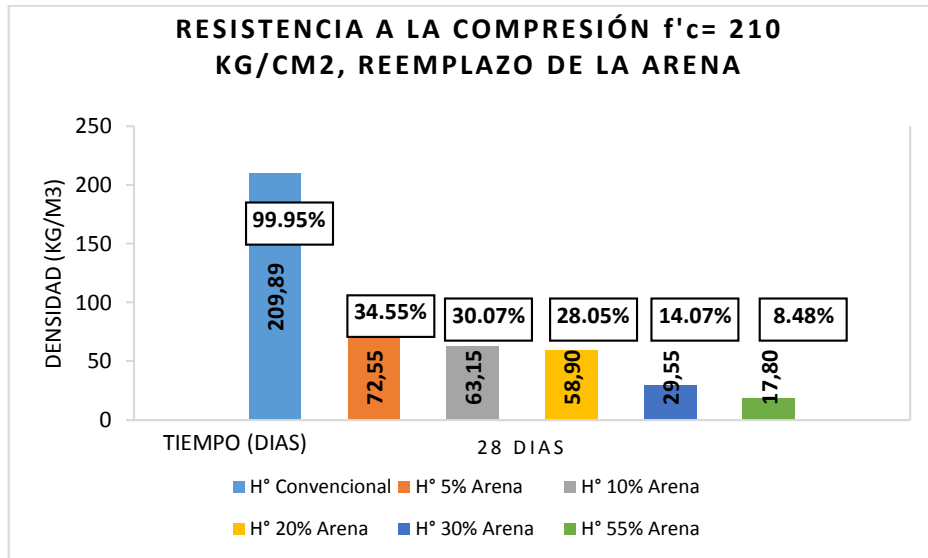


**Figura 34.** Resistencia a la compresión del Hormigón,  $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento  
**Fuente:** Fuente propia

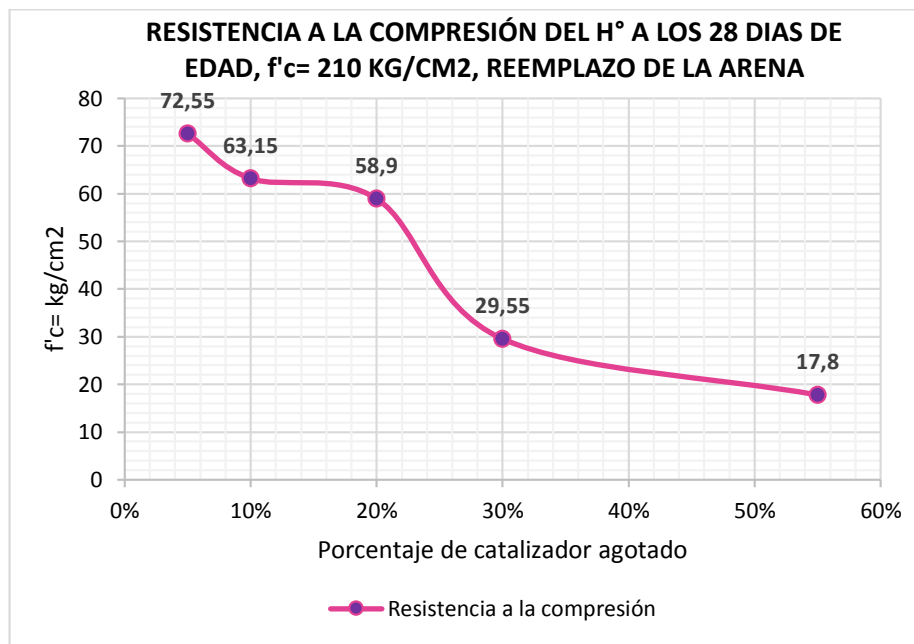


**Figura 35.** Curva de resistencia a la compresión del hormigón,  $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento  
**Fuente:** Fuente propia

Como se puede observar en las figuras 34 y 35, las probetas con algún porcentaje de catalizador como reemplazo del cemento han alcanzado resistencias a la compresión hasta el 40% aproximadamente de la resistencia de diseño, siendo la mayor resistencia la correspondiente a la probeta con 10% de catalizador agotado. En la curva de la figura 26 se observa de mejor manera como disminuye la resistencia a la compresión del hormigón a medida que se incrementa el porcentaje de catalizador.



**Figura 36.** Resistencia a la compresión del Hormigón,  $f'c= 210$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo arena  
**Fuente:** Fuente propia

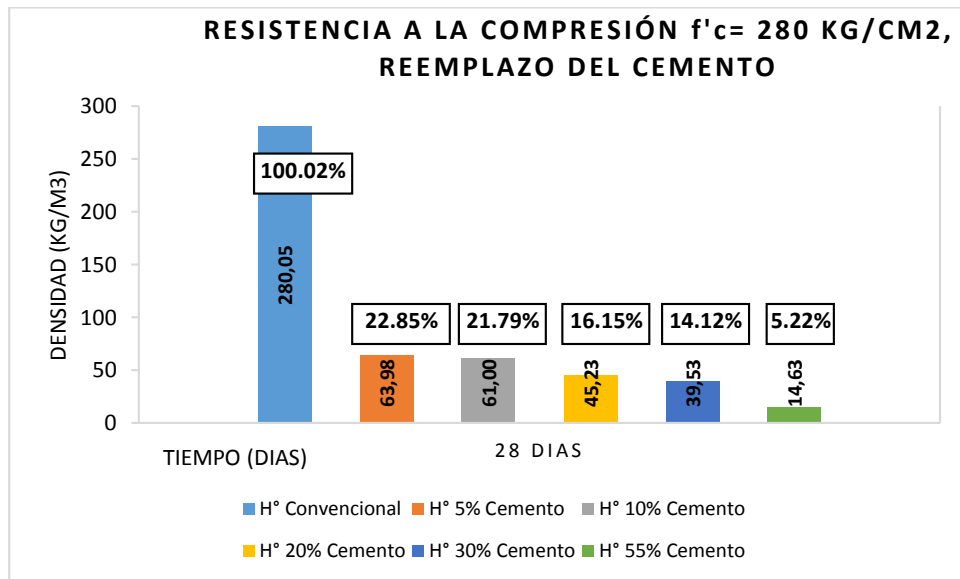


**Figura 37.** Curva resistencia a la compresión del hormigón,  $f'c= 210$  kg/cm<sup>2</sup>, reemplazo arena  
**Fuente:** Fuente propia

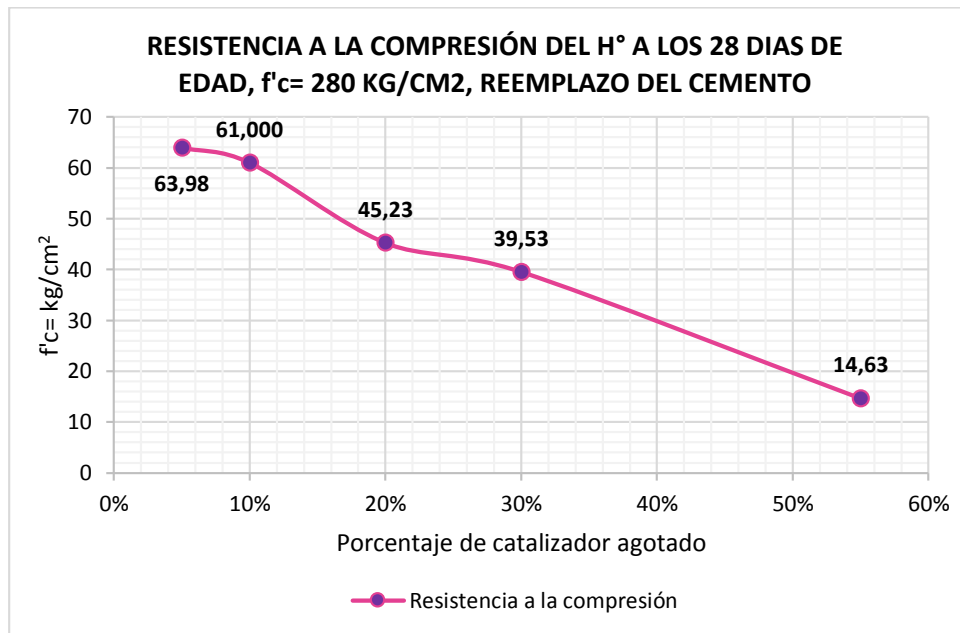
Las figuras 36 y 37 indican que las probetas de hormigón con algún porcentaje de catalizador como reemplazo de la arena han alcanzado resistencias a la compresión hasta el 35% aproximadamente de la resistencia de diseño, siendo la mayor resistencia la correspondiente a la probeta con 5% de catalizador agotado. En la curva de la figura 28 se observa la disminución de la resistencia del hormigón a la compresión al aumentar el porcentaje de catalizador agotado. La resistencia alcanzada en los porcentajes 10 y 20% son



cercanas, por tal motivo la curva no adopta una pendiente más pronunciada, sin embargo los valores indican que si existe una reducción de capacidad.



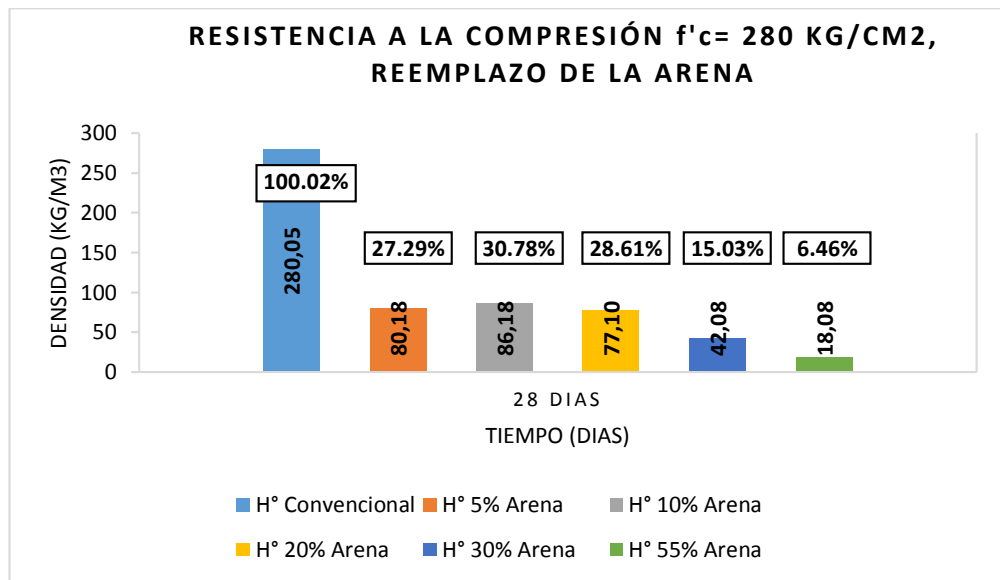
**Figura 38.** Resistencia a la compresión del Hormigón,  $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento  
**Fuente:** Fuente propia



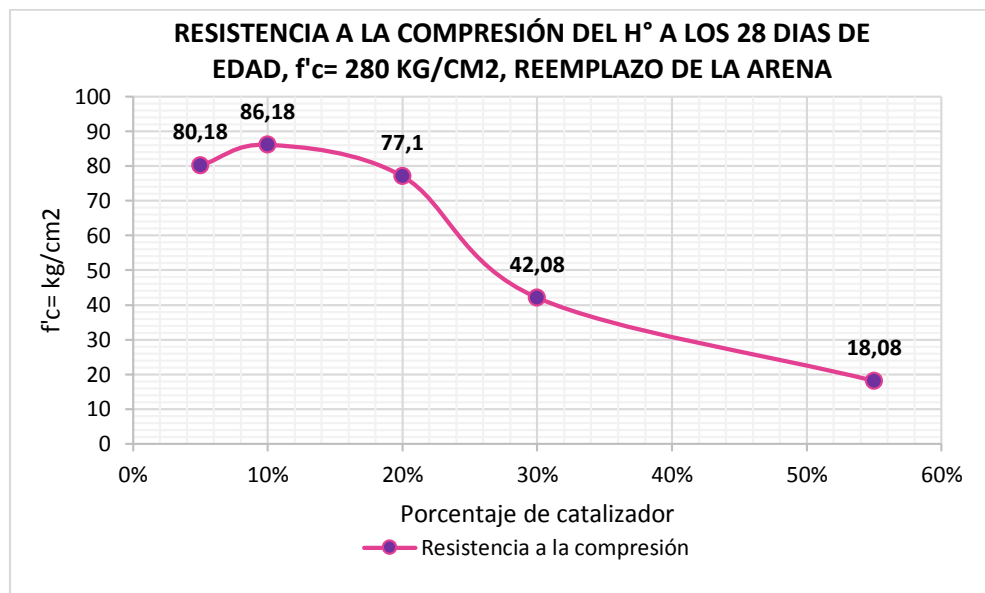
**Figura 39.** Curva resistencia a la compresión del hormigón,  $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo cemento  
**Fuente:** Fuente propia

Las figuras 38 y 39 indican que las probetas de hormigón a las cuales se les ha adicionado un porcentaje de catalizador como reemplazo del cemento han alcanzado resistencias a la compresión hasta el 25% aproximadamente de la resistencia de diseño, siendo la mayor resistencia la correspondiente a la probeta con 5% de catalizador agotado. En la curva de la figura 30 se observa

la disminución de la resistencia del hormigón a la compresión al aumentar el porcentaje de catalizador agotado. Debido a que la resistencia de diseño del hormigón patrón es de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , los porcentajes de resistencia alcanzados con las probetas modificadas son menores que las resistencias alcanzadas para el hormigón de  $210 \text{ kg/cm}^2$ .



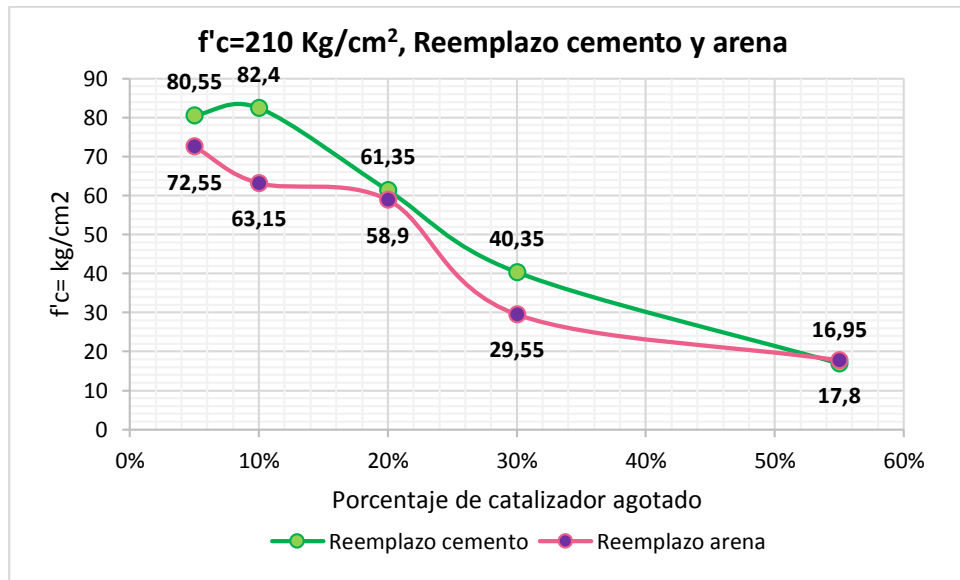
**Figura 40.** Resistencia a la compresión del hormigón,  $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo arena  
*Fuente: Fuente propia*



**Figura 41.** Curva resistencia a la compresión del hormigón,  $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$ , reemplazo arena  
*Fuente: Fuente propia*

Las figuras 40 y 41 indican que las probetas de hormigón a las cuales se les ha adicionado un porcentaje de catalizador como reemplazo del cemento han alcanzado resistencias a la compresión hasta el 30% aproximadamente de la

resistencia de diseño, siendo la mayor resistencia la correspondiente a la probeta con 10% de catalizador agotado. En la curva de la figura 32 se observa la disminución de la resistencia del hormigón a la compresión al aumentar el porcentaje de catalizador agotado. Debido a que la resistencia de diseño del hormigón patrón es de  $280 \text{ kg/cm}^2$  para este caso, los porcentajes de resistencia alcanzados con las probetas modificadas son menores que las resistencias alcanzadas para el hormigón de  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

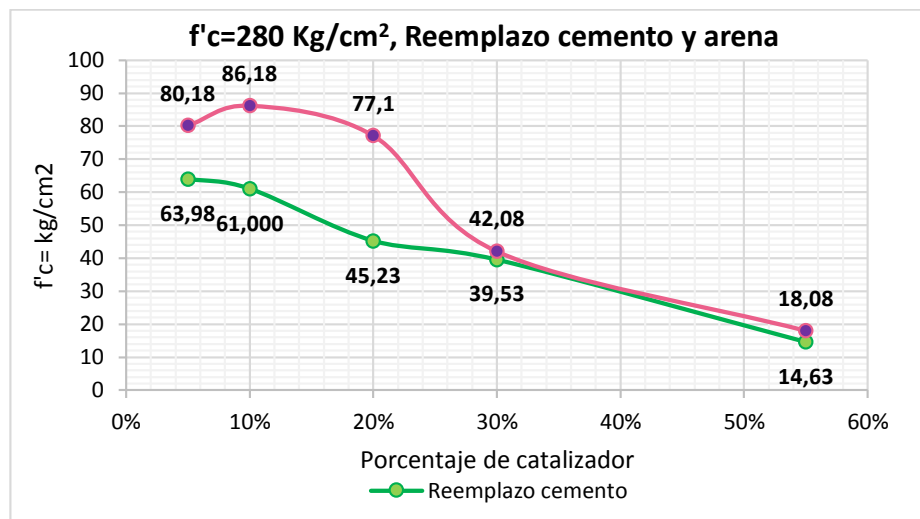


**Figura 42.** Comparación entre resistencias a la compresión del hormigón sustituido con catalizador el cemento y la arena,  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

**Fuente:** Fuente propia

En la figura 42 se muestran dos curvas que representan la resistencia a la compresión del hormigón adicionado con catalizador agotado en los porcentajes que se indican. Lo que se pudo observar es que en la curva del cemento la máxima resistencia se alcanza con un porcentaje del 10% y posteriormente disminuye, esta resistencia es superior a la resistencia adquirida por el hormigón con 5% de catalizador agotado. En la curva de la arena se observa que la mayor resistencia adquirida corresponde al 5% de catalizador agotado y a continuación disminuye, dando valores cercanos entre el 10 y 20%, lo que hace que la curva adquiera una forma algo confusa.

Las resistencias adquiridas por los hormigones adicionados con catalizador agotado en reemplazo del cemento son superiores a las resistencias obtenidas por los hormigones en los cuales se reemplazó la arena.



**Figura 43.** Comparación entre resistencias a la compresión del hormigón sustituido con catalizador el cemento y la arena,  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$   
**Fuente:** Fuente propia

En la figura se muestran dos curvas que representan la resistencia a la compresión del hormigón adicionado con catalizador agotado en los porcentajes que se indican. Las resistencias adquiridas por los hormigones adicionados con catalizador agotado en reemplazo de la arena son superiores a las resistencias obtenidas por los hormigones en los cuales se reemplazó el cemento.

### 4.3 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Una vez realizados los ensayos de laboratorio a los materiales y a las probetas de hormigón modificado, se comprueba que la resistencia a la compresión a los 28 días de edad por el concreto adicionado con catalizador agotado, no es alcanzada y mucho menos superada. Por los resultados obtenidos en las probetas ensayadas no se pudo demostrar la hipótesis, y el hormigón elaborado con catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado no alcanza una resistencia superior a la resistencia de diseño del 99,99% obtenida por un hormigón convencional; con este material solamente se logra alcanzar hasta el 40% de la capacidad de diseño de un concreto de  $210 \text{ kg/cm}^2$  y del 30% en un hormigón de  $280 \text{ kg/cm}^2$ .

Por lo tanto se rechaza la hipótesis afirmativa y se acepta la hipótesis nula que dice, “El catalizador agotado obtenido de los procesos de craqueo catalítico fluidizado no puede reemplazar al cemento puzolánico o a la arena en proporciones específicas en un concreto convencional, de tal manera que si se

*adiciona este material al hormigón simple, su resistencia a la compresión a los 28 días de edad no podrá ser alcanzada, y sus propiedades mecánicas serán inadecuadas”.*

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- El catalizador agotado proveniente de los procesos de refinación de la industria petroquímica, al ser un desecho de esta industria no posee ningún valor económico. El motivo por el cual se pretendió utilizar este material dentro de un hormigón convencional se debe a que posee características físico – químicas semejantes a las propiedades de la arena y del cemento, características importantes como la Zeolita, la alúmina, el óxido de calcio y otras tantas propiedades, siendo las mencionadas las más relevantes (tabla 7).

Varios estudios realizados en países donde la industria petroquímica se ha desarrollado de manera más acelerada que en Ecuador, indican que el catalizador agotado de craqueo catalítico fluidizado puede ser utilizado como un componente de morteros en determinadas proporciones, siendo los porcentajes más óptimos entre el 5% al 20% de reemplazo del cemento o a su vez de la arena. En estos estudios, la tecnología para estudiar microscópicamente las propiedades del catalizador agotado y su comportamiento en las mezclas de morteros es superior a cualquier tecnología existente en el país y el tiempo que conllevan esos estudios son prolongados e incluso se lo viene estudiando desde el siglo pasado.

Países como Venezuela y España, así como Japón, indican resultados positivos para utilizar al catalizador agotado como material sustituto en morteros, en fabricación de baldosas y materiales de construcción, así como también manifiestan que se lo puede incorporar durante el proceso de fabricación del cemento, reduciendo así costos de manufactura y ganancias económicas importantes para la industria cementera. Sin embargo, el presente estudio no permitió validar estas afirmaciones y los ensayos realizados en el laboratorio indican que la máxima resistencia alcanzada de muestras preparadas con catalizador agotado pueden alcanzar hasta el 39.24%, en una

probeta de hormigón no convencional con un 10% de catalizador en reemplazo del material cementante para un hormigón de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

- Para conocer la composición química del residuo de catalizador se solicitó en Refinería Esmeraldas la información de este material actualizadas hasta el año 2014. Una vez obtenidas las propiedades se determinó que el tamaño entre las partículas de cemento y las partículas de catalizador poseen tamaños diferentes, siendo el tamaño de las partículas de catalizador mucho mayores a las del cemento. Por otra parte, la superficie específica de ambos materiales es baja, por lo cual al interaccionar con el agua se ve disminuida su respectiva capacidad reactiva. Una solución a estas diferencias, puede ser encontrar una tecnología adecuada que permita moler el residuo del catalizador hasta obtener valores semejantes en los parámetros granulométricos obtenidos por la muestra de cemento, con el objeto de homogeneizar el tamaño de partícula y averiguar qué resultados se pueden obtener con estos nuevos tamaños.
- Durante el proceso de amasado de las mezclas se pudo observar que, mientras mayor era el porcentaje de catalizador agotado empleado en el hormigón, mayor era la demanda de agua debido a que las partículas de catalizador absorbían la mayor cantidad de líquido sin permitir que el cemento pueda reaccionar e hidratarse. En el análisis de resultados se indican las cantidades de agua utilizada y la relación agua/cemento. Parece ser que el catalizador agotado actúa como material fino dentro de la mezcla y esto se traduce en mayor cantidad de agua de amasado, por lo tanto la resistencia a la compresión disminuye.
- Debido a que el hormigón está constituido por materiales de distinta densidad real, tiende a producirse la decantación de los materiales de mayor peso unitario, que son los sólidos, y el ascenso del más liviano que es el agua. La película superficial del hormigón presenta un contenido de agua mayor que el resto de la masa. Ello significa un aumento en la relación agua/cemento, con una consiguiente menor resistencia por dicha capa. Una solución para resolver este inconveniente podría ser el aumento de la pasta manteniendo la relación agua/cemento o la incorporación de aditivos plastificantes a las mezclas con residuo de catalizador.

- Respecto a la densidad en estado fresco de los hormigones adicionados con catalizador agotado, se puede comprobar que a mayor cantidad de agua de amasado que se empleó durante el proceso de fabricación, la densidad va disminuyendo. Para el caso de las probetas patrón de 210 y 280 kg/cm<sup>2</sup>, la densidad en estado fresco se mantuvo dentro de los límites para un hormigón ordinario. En el caso de los hormigones con residuo de catalizador, a medida que se incrementaba el porcentaje de catalizador, su densidad se veía disminuida. En todos los casos, la densidad fue un factor clave para comprender que la relación agua/cemento se encontraba demasiado alta.
- En la presente investigación se planteó reemplazar a dos componentes fundamentales del hormigón simple: el cemento y la arena; es por ello que se prestó especial atención en los resultados obtenidos para ambos casos. Las densidades alcanzadas por los hormigones en los cuales se reemplazó el cemento son superiores a las densidades alcanzadas por los hormigones en los cuales se reemplazó la arena. Esto se debe a que el catalizador actúa como un material sumamente fino que requiere mayor cantidad de agua de amasado, y debido a que la cantidad de arena es superior a la cantidad de cemento en la dosificación, al reemplazar la arena, aparece mayor material fino. Por el contrario, si se reemplaza la cantidad de cemento en la mezcla, no implica el aumento significativo de catalizador, por lo tanto estas mezclas poseen una relación agua/cemento menor. La densidad en estado endurecido se expresa de manera similar a las densidades de los hormigones en estado fresco.
- El caso del hormigón de 280 kg/cm<sup>2</sup> es opuesto al primer caso. Debido a que este hormigón es de una resistencia mayor al hormigón de 210 kg/cm<sup>2</sup>, requiere una cantidad de agua menor a la cantidad de agua empleada en la primera mezcla de concreto, lo mismo ocurre con la arena y la grava. Para alcanzar esta resistencia, el cemento y la cantidad de agua son los materiales que deben cuidarse. Como se retiró porcentajes de cemento importantes y se sustituyó por catalizador agotado, además que se incrementó la relación agua/cemento, la resistencia a la compresión no pudo alcanzar valores significativos. En el caso de la sustitución de la arena por residuo de catalizador, el cemento se mantuvo constante y la relación agua/cemento no se incrementó significativamente. Como conclusión, el hormigón de 280



kg/cm<sup>2</sup> obtuvo un comportamiento contrario al hormigón de 210 kg/cm<sup>2</sup>, para el primer caso (280 kg/cm<sup>2</sup>), mayor resistencia a la compresión la obtuvieron las probetas con sustitución de arena y para el segundo caso, (210 kg/cm<sup>2</sup>) las muestras con reemplazo de cemento alcanzaron mayor resistencia. En ambos casos no se pudo llegar a la resistencia de diseño de cada hormigón.

- La norma ASTM C39 indica el tiempo que deben ser retiradas del agua de curado las probetas para ser ensayadas - mínimo dos horas y máximo un día- y de esa manera se procedió para ensayar los hormigones de este estudio. La estructura de las muestras adicionadas catalizador agotado se presentaron húmedas hasta el momento de su ruptura y su forma de fallo fue de pequeñas grietas en los extremos superior e inferior, parecido al modo de fallo de fisura vertical columnar a través de ambos extremos.
- Finalmente, una vez realizados los ensayos a todas las muestras de hormigón adicionado residuo de catalizador, se pudo observar que su estructura interna presentaba problemas de adherencia y el material no se convirtió en un cuerpo fundido monolíticamente. Los agregados gruesos se disgregaban fácilmente de la pasta de cemento, y se observaban los espacios que quedaban en la pasta que no pudo unir a los materiales gruesos. En conclusión, el catalizador agotado como sustituto de los componentes del hormigón convencional no pudo alcanzar la resistencia deseada y además no pudo comportarse como material cementante que mantenga unidos a todos los elementos del hormigón.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- Una vez conocidos los resultados obtenidos con este estudio, se recomienda que antes de utilizar el catalizador agotado como un componente del hormigón simple, se elaboren morteros con porcentajes bajos de residuo catalítico, debido a que los estudios investigativos antecesores al presente, indican que en morteros, la resistencia alcanzada es muy cercana a la resistencia de diseño.
- Una recomendación importante es que se debe tener mucho cuidado al momento de adquirir el cemento y la densidad real de este material no debe asumirse, más bien es un ensayo que no puede omitirse.

- Debido a que la relación agua/cemento fue un factor clave en la baja resistencia del hormigón adicionado con residuo, puede controlarse esta disyuntiva adicionando un aditivo plastificante que mejore la trabajabilidad durante el amasado de la mezcla, y sería necesario probar los resultados que se obtienen con esta nueva fórmula.
- Para futuras investigaciones en este tema, se recomienda que a más de las probetas realizadas en el presente estudio, se realicen más probetas con los mismos porcentajes de catalizador agotado pero en este caso que no sean sometidas a curado, más bien que permanezcan a la temperatura ambiente por 90 días para comprobar si el cambio volumétrico que presentaron las probetas ensayadas se debe a que absorbieran el agua durante el tiempo de curado, y determinar con este procedimiento la resistencia a la compresión del nuevo hormigón.
- Finalmente, se destaca que esta investigación no agota el tema, sólo da una importante apertura al desarrollo de materiales alternativos de construcción, por lo que se invita a continuar profundizando en esta línea investigativa, para lograr mayores avances en esta tecnología, siempre y cuando se planteen nuevas alternativas de investigación o nuevos procesos de dosificación, mezclado y curado.

## C. MATERIALES DE REFERENCIA

### BIBLIOGRAFÍA




- [1] J. PAYÁ, J. MONZÓ y M. BORRACHERO, «Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1999.
- [2] M. ROMO, «Capítulo I - Fundamentos del Hormigón Simple,» de *Temas de Hormigón Armado*, Quito, Escuela Politécnica del Ejército, 2009, pp. 1 - 26.
- [3] S. MEDINA, ENSAYO DE MATERIALES II, AMBATO: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2012.
- [4] M. GABALEC, TIEMPO DE FRAGUADO DEL HORMIGÓN, La Plata: Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata, 2008.
- [5] «APUNTES DE INGENIERÍA CIVIL,» [En línea]. Available: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/hidratacion-del-cemento.html>. [Último acceso: 7 Enero 2016].
- [6] «sites.google.com,» Google Sites, 2012. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/grupocmateriales/home/introduccion/reacciones-de-hidratacion>. [Último acceso: 16 Diciembre 2015].
- [7] E. A. BECKER, «ARCcon.com,» Empre.com.ar, [En línea]. Available: <http://www.arqcon.com.ar/pprof/Lnegra/ppcemento2.htm>. [Último acceso: 7 Enero 2016].
- [8] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI-318s-08) y Comentario, Estados Unidos de Norte América: ACI, 2008.
- [9] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, «NTE INEN 696:2011,» de *NORMAS TÉCNICAS ECUATORIANAS*, Quito, INEN, 2011.
- [10] ICCYC, «ICCYC.com,» n.d.. [En línea]. Available: [http://www.bidi.uam.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=62:citar-recursos-electronicos-normas-apa&catid=38:como-citar-recursos&Itemid=65#2](http://www.bidi.uam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=62:citar-recursos-electronicos-normas-apa&catid=38:como-citar-recursos&Itemid=65#2).
- [11] BASF, «Spent Catalyst Recycle in Concrete,» Estados Unidos de Norte América, 2015.
- [12] J. McCORMAC y R. BROWN, Diseño de Concreto Reforzado, Mexico D.F.:

Alfaomega S.A., 2011.

- [13] I. MILLES, «ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CATALIZADORES GASTADOS DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO POSIBLE REEMPLAZO DEL MATERIAL CEMENTANTE,» Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2012.
- [14] D. GRACE, Guía para craqueo catalítico fluidizado - Parte Uno, Baltimore: W.R. Grace & Co.-Conn, 1993.
- [15] M. PAUCAR, Estudio de la actividad del catalizador circulante en la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) de la Refinería Estatal Esmeraldas (REE), Quito: Universidad de San Francisco de Quito, 2011.
- [16] GRUPO EL COMERCIO, «En Ecuador, el consumo de cemento crece a ritmo sostenido,» *LÍDERES*, 2013.
- [17] fdf, fdf, ffbg ed., dsffsd: dasf, dsfdf.
- [18] CIMENT CATALÁ, «CIMENT CATALÁ, El cemento es Vida,» 2003. [En línea]. Available: [http://www.ciment-catala.org/ePub/easnet.dll/ExecReq/Page?eas:template\\_im=001C29&eas:dat\\_im=001BA7](http://www.ciment-catala.org/ePub/easnet.dll/ExecReq/Page?eas:template_im=001C29&eas:dat_im=001BA7).
- [19] L. SORIANO M., *Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de craqueo catalítico usado (FCC)*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [20] EL UNIVERSO, «Demanda de cemento sube y dinamiza la producción local,» *EL UNIVERSO*, 7 Mayo 2012.

ANEXOS

ANEXO 1. FICHA TÉCNICA DEL CEMENTO SELVALEGRE, UTILIZADO EN ESTE ESTUDIO.

 <b>UNACEM</b> <small>ASOCIACIÓN ECUATORIANA DE INDUSTRIALES</small> <b>ECUADOR</b> <small>ASEGURAMIENTO DE CALIDAD</small>		<b>CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO</b>  <b>GRANEL TIPO IP</b> <b>SELVALEGRE</b>		Fecha:
		<b>INEN 490</b>		Número de Gota:
<b>ANÁLISIS QUÍMICO</b>				
Pérdida por calcinación	[ % ]	5,0 máximo		1,1
SiO <sub>2</sub>	[ % ]			31,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[ % ]			5,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[ % ]			4,1
CaO	[ % ]			47,3
MgO	[ % ]	8,0 máximo		2,4
SO <sub>3</sub>	[ % ]	4,0 máximo		1,8
Na <sub>2</sub> O	[ % ]			1,8
K <sub>2</sub> O	[ % ]			0,5
TiO <sub>2</sub>	[ % ]			0,3
<b>TOTAL</b>				<b>99,8</b>
Cal Libre	[ % ]			1,0
<b>ENSAYOS FÍSICOS</b>				
Blaine	[ cm <sup>2</sup> /g ]			3398
Malla : 325	[ % ]			4,8
Consistencia normal	[ % ]			25,9
Peso volumétrico	[ Kg/l ]			1,013
Fraguado inicial	[ min ]	45 mínimo		131
	[ min ]	420 máximo		288
Fraguado final	[ min ]			
Densidad	[ g/ml ]			2,983
Expansión al autoclave	[ % ]	0,8 máximo		0,07
Contracción al autoclave	[ % ]	0,2 máximo		—
Contenido de Aire	[ % ]	12,0 máximo		8,8
<b>Resistencia</b>				
1 Día	[ MPa ]			9,8
3 Días	[ MPa ]	13,0 mínimo		18,6
7 Días	[ MPa ]	20,0 mínimo		21,0
28 Días	[ MPa ]	25,0 mínimo		27,3
Observaciones: El presente certificado, contiene valores promedio de un bache de producción de quince días. El resultado de expansión al autoclave, se actualizará con resultado de Laboratorio externo.				
			  Roberto Espinosa Jefe de Ingeniería de Calidad	

## ANEXO 2. ANEXO FOTOGRÁFICO

Materiales para preparar la mezcla: Cemento	
<b>Cemento Selvaegre</b>	<b>Arena (agregado fino)</b>
	
<b>Grava (agregado grueso)</b>	<b>Agua</b>
	
<b>Catalizador Agotado</b>	
	

**Preparación de la mezcla: Catalizador agotado en reemplazo del cemento**



**Proceso de amasado del hormigón**



**Mezcla de hormigón con catalizador agotado en reemplazo de la arena**



**Medición de la consistencia de la mezcla de hormigón**



**Muestras de hormigón fresco adicionado con catalizador agotado**





**Muestras de hormigón desmoldadas al día siguiente de la preparación**



**Probetas de hormigón en la cámara de curado**



**Probetas de hormigón en proceso de secado para el ensayo de compresión**



**Ensayo de compresión del hormigón adicionado con residuo de catalizador a los 28 días de edad**



**Tipo de fractura de las probetas con catalizador agotado**



**Tipo de fractura de las probetas con catalizador agotado**



**Ensayos de compresión realizados en el laboratorio de EcoHormigones**



**Probetas de hormigón ensayadas en el laboratorio de EcoHormigones**



**Estructura interna del hormigón endurecido adicionado catalizador agotado**



**Estructura interna del hormigón endurecido adicionado catalizador agotado**

