

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CATALIZADORES
GASTADOS DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO POSIBLE
REEMPLAZO DEL MATERIAL CEMENTANTE**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por el Br.:

Milles Dommar, Ignacio Eduardo

para optar al Título de

Ingeniero Civil

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CATALIZADORES GASTADOS DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO POSIBLE REEMPLAZO DEL MATERIAL CEMENTANTE

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Trino Baloa

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br.:
Milles Dommar, Ignacio Eduardo
para optar al Título de
Ingeniero Civil

Caracas, 2012

ACTA

El día 12 de Noviembre de 2012 se reunió el jurado formado por los profesores:

CÉSAR PEÑUELA.
María Koro dy
Trino Baloa

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: “ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CATALIZADORES GASTADOS DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO POSIBLE REEMPLAZO DEL MATERIAL CEMENTANTE”.
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de INGENIERO CIVIL.

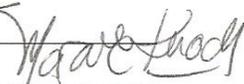
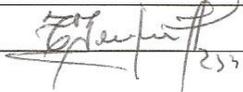
Una vez oída la defensa oral que el (la, las, los) bachiller(es) hicieron de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Números	Letras
Br. Ignacio E. Milles D.	20	Veinte

Recomendaciones:

~~_____~~
~~_____~~
~~_____~~

FIRMAS DEL JURADO

Caracas, 12 de 11 de 2012

a mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Ante todo le doy gracias a Dios, nuestro padre celestial, porque sin él no podemos lograr nada en esta vida, gracias Dios te doy desde el fondo de mi corazón. Mi núcleo familiar ha sido la base de mis éxitos, mi papá súper comprensivo, mi mamá con su actitud perseverante y mi hermana Dayana con su apoyo incondicional y paciencia. A ustedes les debo todo lo que soy, GRACIAS!

A mi tutor Trino, con tu Actitud Mental Positiva, me recibiste desde el principio, juntos planteamos una idea que hoy es una realidad, superamos obstáculos, rompimos barreras, lo logramos mi pana.

A un grupo de personas que conocí durante la realización de este TEG, sin ellos esto no hubiese sido posible: Al Sr. Mario, quien me abrió las puertas del laboratorio de control de calidad de la Corporación Socialista de Cemento; Al Prof. Camacho por su aporte en el manejo de las normas COVENIN para la realización de los ensayos, Al Prof. Jesús Batista por su ayuda en la realización de los ensayos fisicoquímicos a las muestras del catalizador; A los técnicos Génesis, Robert y en especial a Mishel, por su apoyo logístico y técnico durante la preparación de las mezclas de mortero y en el desarrollo de los ensayos mecánicos planteados en la investigación. Gracias amigos! siempre pendientes y atentos.

A todas las personas que me apoyaron durante mis estudios, amigos, no tan amigos y conocidos, me brindaron conocimientos, me han hecho ver que la vida no es fácil y con cada vivencia (buena o mala), me regalaron un aprendizaje. Les doy gracias a todos por hacer que mi vida como estudiante haya sido tan llena de alegría, por brindarme su amistad incondicional y su compañía, y haber compartido tantos momentos felices, los cuales quiero que sigan repitiéndose y disfrutemos por mucho tiempo.

Ignacio

Milles D. Ignacio E.

**ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CATALIZADORES
GASTADOS DE CRAQUEO CATALÍTICO (FCC) COMO POSIBLE
REEMPLAZO DEL MATERIAL CEMENTANTE**

Tutor Académico: Prof. Trino Baloa.

**Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Civil. 2012, n° de pág. 134.**

RESUMEN

Palabras claves: cemento portland, adiciones, residuo de craqueo catalítico CCF, puzolana, actividad puzolánica.

El catalizador gastado de craqueo catalítico (CCF con sus siglas en inglés FCC) es un residuo procedente de las unidades de ruptura catalítica en lecho fluido de la industria del petróleo. En este trabajo se realizó un estudio fisicoquímico de los residuos de catalizador procedentes de la industria petrolera venezolana (PDVSA) para evaluar su incorporación como adición al cemento Portland Tipo I-R. Para ello, se caracterizaron de manera física y química las muestras del residuo de CCF y del cemento Portland suministradas por la refinería de Amuay y la Fábrica Nacional de Cemento respectivamente, a través de microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, granulometría laser, entre otros. Así mismo se determinaron las propiedades mecánicas (tiempo de fraguado y resistencia a compresión) en morteros adicionados con el catalizador gastado, para finalmente estimar la actividad puzolánica propia de este material. Los resultados de la evaluación física arrojaron diferencias apreciables en el tamaño de partícula del cemento y el residuo del catalizador en estado original. En cuanto al análisis químico se verificó la presencia de silicato tricálcico en el cemento y, de aluminatos y silicatos en el residuo CCF. Así mismo, los resultados de los ensayos mecánicos indicaron que los morteros con adición de residuo

de CCF presentaron un desarrollo lento de resistencia y una disminución de la fluidez a medida que se incrementó el porcentaje de residuo. Finalmente, el índice de actividad puzolánica obtenido para cada mezcla indicó que si es posible el uso de catalizadores gastados CCF con las características físicas y químicas mostradas en este trabajo, como sustituto parcial del cemento Portland I-R en mezclas de mortero para uso estructural entre 5 y 15% en peso del cemento.

ÍNDICE GENERAL

	Página
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Aportes	5
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	6
2.1 El Cemento	6
2.1.1 Tipos de cementos.....	8
2.1.2 Hidratación del cemento.....	10
2.1.3 Microestructura de la pasta de cemento	12
2.2 Puzolanas	13
2.2.1 Clasificación de las puzolanas según su origen	14
2.2.2 Índice de actividad puzolánica	14
2.3 Descripción general del proceso de craqueo catalítico fluidizado	15
2.4 Importancia de las unidades de craqueo catalítico fluidizado	15
2.5 Catalizador gastado de craqueo catalítico	16

2.6	Mortero	18	
2.6.1	Componentes del mortero	18	
2.7	Glosario de Términos	21	
2.8	Presentación de la empresa que proporciona el CCF	24	
2.9	Generalidades sobre el Centro de Refinación Paraguaná.....	25	
2.10	Consumo de catalizadores en las refinerías del país.....	26	
2.11	Inversión y producción de cemento en Venezuela	27	
2.12	Antecedentes.....	30	
2.12.1	Actividad puzolánica y propiedades mecánicas de los CCF.....	30	
2.12.2	Hidratación del CCF en pastas de cemento Portland	31	
2.12.3	Durabilidad de morteros y concretos adicionados con CCF	31	
CAPÍTULO III			
MARCO METODOLÓGICO			33
Flujograma para el estudio del comportamiento de los CCF como adición al cemento			34
Fase I: Recopilación bibliográfica del tema.....			35
Fase II: Obtención de muestras de CCF gastado y cemento Portland I-R			35
Fase III: Estudio de las propiedades fisicoquímicas de los residuos CCF y del cemento Portland Tipo I-R.....			36
1. Composición química.....			36
2. Difracción de Rayos X			36
3. Análisis granulométrico.....			37
4. Microscopía electrónica de barrido.....			38
5. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine			39

6. Determinación de la finura por medio del tamiz #325	41
7. Determinación de la densidad por medio de un frasco de Le Chatelier	42
Fase IV: Elaboración de mezclas de mortero patrón y modificado	44
Fase V: Ensayos de las mezclas de mortero	47
1. Mortero en estado fresco	47
1.1 Peso unitario	47
1.2 Tiempo de fraguado	49
2. Mortero en estado endurecido	53
2.1 Resistencia a la compresión de probetas cúbicas	53
2.2 Índice de actividad puzolánica	54
Fase VI: Análisis y presentación de resultados	55
CAPÍTULO IV	
RESULTADOS	64
CAPÍTULO V	
ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
5.1 Composición química de las muestras	77
5.2 Comparación de los difractogramas de rayos X de las muestras	78
5.3 Análisis del tamaño de partículas en las muestras	79
5.4 Morfología de las partículas que conforman las muestras	82
5.5 Densidad promedio de las muestras	83
5.6 Ensayo de medición del tiempo de fraguado con la Aguja de Vicat	83
5.7 Peso unitario compactado de las mezclas de mortero en estado fresco	86
5.8 Ensayos de resistencia a compresión	86

CONCLUSIONES.....	91
RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFÍA	97
APÉNDICE A: Certificado de calidad del cemento utilizado.....	102
APÉNDICE B: Hoja de seguridad del catalizador CCF	103
APÉNDICE C: Características de la arena de Ottawa.....	107
APÉNDICE D: Difractogramas de Rayos X de las muestras estudiadas.....	109
APÉNDICE E: Granulometría de las muestras estudiadas	111
APÉNDICE F: Análisis por microscopía electrónica de barrido y EDX.....	113
APÉNDICE G: Planillas del ensayo de densidad de las muestras estudiadas	122
APÉNDICE H: Planillas de los ensayos tipificados de las muestras estudiadas.....	123
APÉNDICE I: Planillas para el ensayo de tiempo de fraguado	124
APÉNDICE J: Data del ensayo de resistencia a compresión	131

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.1 Impurezas tolerables en el agua de mezclado de concreto y mortero	20
Tabla 2.2 Requisitos físicos del cemento	21
Tabla 2.3 Cuadro comparativo entre la producción y venta de cemento en Venezuela para los meses Junio 2011 y Junio 2012	28
Tabla 3.1 Dosificación de materiales a mezclar para la preparación de probetas cúbicas ..	45
Tabla 3.2 Dosificación de materiales a mezclar en el ensayo de Tiempo de fraguado	49
Tabla 3.3 Valores de d^2 y de $1/d^2$ en función del número de probetas de la serie	60
Tabla 3.4 Valores de V_1 para diferentes grados de control.....	61
Tabla 3.5 Valores de SL para diferentes grados de control.....	62
Tabla 4.1 Composición química por ICP-EA de las muestras estudiadas.....	64
Tabla 4.2 Mineralogía por difracción de Rayos X	65
Tabla 4.3 Principales parámetros granulométricos de las muestras estudiadas.....	66
Tabla 4.4 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS del cemento	67
Tabla 4.5 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS del CCF.....	68
Tabla 4.6 Características físicas de los materiales cementantes.....	69
Tabla 4.7 Porcentaje de agua de amasado, tiempo de fraguado inicial y tiempo de fraguado final para cada una de las mezclas con distinto porcentaje de reemplazo de CCF.....	69
Tabla 4.8 Peso unitario del mortero para cada una de las mezclas con distinto porcentaje de reemplazo de CCF	71

Tabla 4.9 Resistencia a compresión media y desviación típica obtenida de los ensayos a las edades de 3, 7 y 28 días 72

Tabla 4.10 Índice de actividad puzolánica obtenido para cada una de las mezclas en las edades de ensayo 3, 7 y 28 días 75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Cemento Portland I-R	7
Figura 2.2 Evolución del calor en la hidratación del cemento	10
Figura 2.3 Esquema de la hidratación del cemento	11
Figura 2.4 Catalizador gastado de craqueo catalítico FCC	17
Figura 2.5 (izq.) Saco de arena Ottawa (der.) Tara con arena Ottawa.....	19
Figura 2.6 Ubicación de las refinerías del país.....	25
Figura 2.7 Consumo anual de cemento por habitante en Venezuela.....	29
Figura 2.8 Ubicación de las Plantas de Cemento en Venezuela.....	29
Figura 3.1 Equipo Horiba Ultima 2 ICP para análisis químico.....	36
Figura 3.2 Difractómetro modelo Philips PW1840.....	37
Figura 3.3 Equipo granulométrico Mastersizer 2000	38
Figura 3.4 Microscopio electrónico Hitachi S-2400	38
Figura 3.5 (izq) Medición de la masa de cemento (der.) Material dentro de la célula de permeabilidad	40
Figura 3.6 (izq.) Aparato de permeabilidad Blaine (der.) Etiqueta de calibración del aparato de permeabilidad Blaine	41
Figura 3.7 (izq.) Colocación del material sobre el tamiz #325 (der.) Distribución del material con un pincel sobre el tamiz #325	42
Figura 3.8 Volumenómetro de Le Chatelier.....	44

Figura 3.9 (izq.) Medición de la masa del material en la balanza digital (der.) Mezclado de los materiales del mortero.....	46
Figura 3.10 (izq.) Colocación del mortero en los moldes cúbicos (der.) Curado de las probetas cúbicas.....	47
Figura 3.11 (izq.) Medición de la masa del molde (der.) Molde lleno de mortero	48
Figura 3.12 (izq.) División del material en tres partes durante el mezclado (der.) Molde troncocónico con mortero.....	52
Figura 3.13 (izq.) Medición de la penetración con la aguja de Vicat (der.) Probetas de ensayo dentro de la cámara de humedad	53
Figura 3.14 (izq.) Prensa para ensayos de compresión (der.) Falla de las probetas durante el ensayo de compresión.....	54
Figura 4.1 Micrografía de la muestra del cemento: (izq.) con magnificación de 100X (der.) con magnificación de 1500X	67
Figura 4.2 Micrografía de la muestra del CCF: (izq.) con magnificación de 100X (der.) con magnificación de 500X.....	68
Figura 4.3 Falla a compresión. Rotura tipo doble pirámide (1)	76
Figura 4.4 Falla a compresión. Rotura tipo doble pirámide (2)	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Página
Gráfico 2.1 Consumo estimado de catalizadores para refinerías nacionales de PDVSA.....	26
Gráfico 4.1 Difractograma del cemento Portland I-R	64
Gráfico 4.2 Difractograma del catalizador gastado CCF.....	65
Gráfico 4.3 Granulometría del cemento Portland I-R	66
Gráfico 4.4 Granulometría del catalizador gastado CCF.....	66
Gráfico 4.5 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS de la muestra de cemento.....	67
Gráfico 4.6 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS de la muestra de CCF.....	68
Gráfico 4.7 Porcentaje de agua de amasado en función del porcentaje de CCF	70
Gráfico 4.8 Tiempo de fraguado inicial en función del porcentaje de CCF.....	70
Gráfico 4.9 Tiempo de fraguado final en función del porcentaje de CCF	71
Gráfico 4.10 Peso unitario en función del porcentaje de CCF	72
Gráfico 4.11 Resistencia a compresión a los 3 días en función del porcentaje de CCF.....	73
Gráfico 4.12 Resistencia a compresión a los 7 días en función del porcentaje de CCF.....	73
Gráfico 4.13 Resistencia a compresión a los 28 días en función del porcentaje de CCF....	74
Gráfico 4.14 Contraste de tendencia de la resistencia a compresión media en función de la edad de ensayo en cada una de las mezclas.....	74
Gráfico 4.15 Evolución del índice de actividad puzolánica en función de la edad de ensayo en cada una de las mezclas	75

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La industria de la construcción lleva varias décadas incorporando el uso de materiales silíceos o alúmino-silíceos denominados puzolanas para obtener matrices conglomerantes más económicas, ecológicas y con mejores prestaciones. En este sentido se han utilizado materiales de desecho de la industria: agrícola (ceniza de cáscara de arroz), metalurgia (ceniza volante y humo de sílice) e incluso compuestos de síntesis (metacaolín).

En los últimos años, algunos investigadores extranjeros han estudiado las propiedades del residuo de catalizador de craqueo catalítico (CCF) como material puzolánico en sus respectivos países, usándolo como adición a morteros y concretos, ya que el mismo presenta una composición química de base sílico-aluminosa y estructura zeolítica que lo hace altamente reactivo en presencia de agua y de hidróxido de calcio; favoreciendo la formación del gel silicato cálcico hidratado (CSH), el cual representa el compuesto que aporta la mayor parte de las propiedades resistentes en morteros y concretos.

El catalizador de craqueo catalítico (CCF) es un material fino que se utiliza en las refinerías de petróleo para modificar la estructura molecular de ciertos hidrocarburos para obtener combustibles de calidad. Cuando el CCF pierde sus propiedades catalíticas, se debe reemplazar por nuevo catalizador. El residuo de catalizador desactivado se desecha y se trata como un residuo inerte.

En los estudios realizados a morteros adicionados con este residuo se ha comprobado que el mismo mejora las propiedades mecánicas de los morteros y concretos debido a una densificación de la matriz cementicia causada por la reacción puzolánica. Sin embargo, no se han realizado investigaciones que validen la actividad puzolánica de los CCF gastados que se generan en las principales refinerías del país.

1.2 Planteamiento del problema

El origen y utilización de materiales con propiedades cementantes datan de los inicios de la civilización. Los egipcios fueron los primeros en usar materiales con propiedades hidráulicas, como el yeso; los romanos y los griegos usaban a su vez cenizas de origen volcánico, mezcladas con cal, consiguiendo un material de prestaciones mucho mejores. Fueron los romanos los primeros en usar de forma extensiva mezclas hidráulicas de materiales con propiedades cementantes.

En la actualidad, el cemento es uno de los materiales más usados debido a sus innumerables ventajas. A pesar de ello, su producción genera gran cantidad de gases de efecto invernadero (Gartner, 2004). La disminución de estos gases durante la producción de cemento se puede lograr descendiendo el consumo de combustible, o reduciendo la producción de clinker a través de la incorporación de adiciones minerales en el momento de la fabricación de morteros o concretos (Price et al., 1999). Por lo tanto, es una práctica común utilizar en las mezclas materiales silíceos o alúmino-silíceos denominados puzolanas como reemplazo del material cementante, que por lo general son subproductos de otros procesos o materiales de origen natural.

Entre los beneficios que se consiguen con el uso de puzolanas se destaca: la mejora de resistencias mecánicas en morteros y concretos, el aumento de la durabilidad (ACI 201, 2001); la sustitución de parte de cemento y el consumo de los materiales residuales de otros procesos industriales, que de no utilizarse tendrían que almacenarse en vertederos controlados (Roskovic y Biegovic, 2005).

En los últimos años se ha reportado la utilización de un material con carácter puzolánico que mejora el comportamiento de los conglomerantes que lo incorporan; es el caso del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC por las siglas en inglés de Fluid Catalytic Cracking), procedente de la industria del petróleo. La primera referencia

encontrada sobre la reutilización del residuo de catalizador de craqueo catalítico se remonta a 1995, en la que Escardino y sus colaboradores lo utilizan como sustituto del caolín en la preparación de compuestos cerámicos vítreos. (Escardino et al., 1995).

El uso de catalizadores de craqueo catalítico (CCF) se ha extendido durante los últimos años a muchas refinerías del país, dado el interés en la obtención de fracciones ligeras de hidrocarburos (nafta) a partir de petróleo pesado, produciendo gran cantidad de residuos de estos catalizadores, los cuales pueden ser incorporados como adiciones al cemento Portland Tipo I-R. Sin embargo, no se han realizado trabajos experimentales en el sector de la construcción que referencien si los catalizadores usados en el proceso de craqueo que se lleva a cabo en las refinerías del país presentan actividad puzolánica al ser utilizados como reemplazo del material cementante.

La presente investigación pretende estimar la actividad puzolánica de residuos de catalizador de craqueo catalítico (CCF) procedentes de reactores de la refinería de Amuay, cuando éste es utilizado como reemplazo del material cementante. Para su estudio, se realizarán análisis fisicoquímicos de las muestras del catalizador y del cemento a utilizar, para valorar si presentan cambios apreciables en sus propiedades que impidan su uso como un solo material. Seguidamente se desarrollarán diversas mezclas de morteros con el catalizador gastado para estudiar su resistencia y compararlo con un mortero patrón tradicional, permitiendo verificar su cumplimiento con los requerimientos de uso.

Al estudiar estos escenarios, surgen las siguientes interrogantes: ¿Los CCF producidos en la refinería de Amuay serán activos puzolánicamente al utilizarse como reemplazo del material cementante?, ¿Podrán ser utilizados estos residuos sin producir diferencias apreciables en el tiempo de fraguado?, ¿Las mezclas con adiciones realizadas proporcionan valores similares o mayores de resistencia que una mezcla sin adiciones?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el catalizador gastado de craqueo catalítico producido en la refinería de Amuay como material de adición al cemento Portland Tipo I-R.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Valorar las características físicas y químicas de la muestra del catalizador gastado de craqueo catalítico obtenido de la refinería de Amuay.
- Contrastar las propiedades mecánicas entre morteros con adiciones de CCF hasta un 30% en peso de reemplazo de cemento y el mortero patrón.
- Estimar la actividad puzolánica del catalizador gastado de craqueo catalítico CCF en morteros con adiciones de este material.

1.4 Aportes

Existen varias razones para que los productores de cemento de todo el mundo desarrollen el uso de adiciones minerales en los procesos de fabricación de morteros y concretos. Entre las cuales se pueden mencionar: cuestiones ecológicas (utilización de subproductos de otras industrias o procesos, menor generación de CO₂, etc.), aumento de la capacidad instalada de las cementeras, eventual reducción de costos y cierta flexibilidad para la obtención de cementos y concretos de mejor comportamiento y/o propiedades especiales sin demasiados esfuerzos de producción.

Para la sociedad y la construcción, el uso de CCF gastado es importante desde el punto de vista ambiental y económico, pues además de ser un residuo industrial, su inclusión en las mezclas como reemplazo de material cementante llevará al desarrollo de concretos de alto desempeño. De allí su interés a nivel local y mundial.

De obtenerse un comportamiento mecánico aceptable para su uso, permitiría disminuir la cantidad de cemento demandado en la producción de concreto y mortero, lo cual sería beneficioso para abaratar los costos en los desarrollos masivos habitacionales que se están llevando a cabo en la actualidad a lo largo del territorio venezolano.

Al estudiante, fomentará el desarrollo de trabajos experimentales con base a nuevos materiales de construcción y aportará conocimientos de la microestructura del cemento.

Para la Universidad, el trabajo realizado, continuará promoviendo el estudio en el campo de investigación de la tecnología del concreto, a fin de mejorar y consolidar conocimientos específicos sobre adiciones al cemento Portland y por otra parte servirá de base para el desarrollo de futuras investigaciones afines.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

La siguiente información teórica es una recopilación bibliográfica de los temas relacionados con los objetivos planteados para este Trabajo Especial de Grado. Representa la base teórica que permitirá al lector comprender la terminología técnica manejada a lo largo de la investigación.

El marco teórico se organizó atendiendo al orden preestablecido en los objetivos planteados y en el marco metodológico, haciéndolo lo más amigable para las personas que se interesen en revisar el trabajo a ser desarrollado. En un primer plano, se presenta las bases conceptuales, características y propiedades básicas del cemento desde una perspectiva microscópica. Seguidamente se describe las principales adiciones al cemento como material cementante, haciendo énfasis en los residuos del craqueo catalítico en lecho fluidizado. Esta información permitirá comprender las causales de su incorporación como material de reemplazo del cemento. Luego se describe brevemente las características y propiedades de los morteros, lo cual será utilizado cuando se realicen las comparaciones entre las mezclas con adiciones y la mezcla patrón. Por último, se presenta un glosario de términos claves para el desarrollo de este trabajo.

2.1 El Cemento

El cemento Portland es la denominación específica del cemento con fines estructurales, es el componente más costoso de la mezcla, pero en comparación a otros materiales, sigue siendo el más rentable ya que se obtiene a partir de materias primas abundantes en la naturaleza; se produce a través de la combinación química de sílice y alúminas con cal, la misma tiene lugar en la materia molida y se lleva al punto de semi-fusión (Ver Figura 2.1). El producto obtenido se denomina “clinker” y constituye los trozos

que deben ser molidos con una porción de yeso, a fin de regular el tiempo de fraguado. (Porrero et al., 2009)

A los efectos prácticos, el cemento está constituido básicamente por cuatro componentes:

- Silicato tricálcico (C_3S): proporciona altas resistencias iniciales y alto calor de hidratación.
- Silicato dicálcico (C_2S): proporciona desarrollo lento de resistencia y moderado calor de hidratación.
- Aluminato tricálcico (C_3A): proporciona rápido desarrollo de resistencia y muy alto calor de hidratación. Gran sensibilidad a los agresivos químicos (sulfatos).
- Ferroatuminato tetracálcico (C_4FA): proporciona desarrollo lento de resistencia, bajo calor de hidratación y buena resistencia a la agresión química.

Sin embargo presenta otros componentes como: yeso ($CaSO_4 - 2H_2O$), álcalis ($Na_2O + K_2O$), magnesia (MgO), cal libre ($CaO + Ca(OH)_2$) y residuos insolubles ($SiO_2 + R_2O_3$).



Figura 2.1 Cemento Portland I-R. (Fuente propia)

2.1.1 Tipos de cementos

Existen cinco tipos de cemento producto de la combinación de las proporciones de las materias que componen el cemento:

- **Tipo I:** para uso general, es el que más se emplea para fines estructurales cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para los otros tipos de cemento. En Venezuela, se presenta una subdivisión de este cemento: I-R; CPCA-I; CPCA-II.
- **Tipo II:** resistente a ataques de sulfatos y bajo calor de hidratación; cemento modificado para usos generales y se emplea cuando se prevé una exposición moderada al ataque por sulfatos o cuando se requiere un moderado calor de hidratación. Estas características se logran al imponer limitaciones en el contenido de C_3A y C_3S del cemento. El cemento Tipo II adquiere resistencia con más lentitud que el Tipo I.
- **Tipo III:** cemento de alta resistencia inicial, recomendable cuando se necesita una resistencia temprana en una situación particular de construcción. El concreto hecho con el cemento tipo III desarrolla una resistencia en 7 días igual a la desarrollada en 28 días por concretos hechos con cementos Tipo I y II. Dado que el cemento Tipo III tiene un gran desprendimiento de calor, no debe ser usado en vaciados de concretos masivos.
- **Tipo IV:** cemento de bajo calor de hidratación. Se ha desarrollado para usarse en concreto masivo. Si se utiliza como cemento Tipo I en colados masivos que no puedan perder calor por radiación, el cemento libera suficiente calor durante la hidratación aumentando la temperatura del concreto hasta unos 50 °F o 60 °F. Esto causa un aumento relativamente grande de las dimensiones mientras el concreto está todavía en estado plástico; posteriormente, su enfriamiento diferencial después de endurecer ocasiona que se produzcan grietas por contracción.

- **Tipo V:** cemento resistente a los sulfatos, se especifica cuando hay exposición severa a estos compuestos. Las aplicaciones típicas comprenden las estructuras hidráulicas expuestas a aguas con alto contenido de álcalis y en estructuras expuestas al agua de mar. La resistencia al sulfato del cemento Tipo V se logra minimizando el contenido de C_3A , pues este compuesto es el más susceptible al ataque de los sulfatos.

El de uso más extendido corresponde al Tipo I. En Venezuela específicamente el uso de cemento Tipo II y III es restringido, y la situación actual de producción de cemento en el país, limita mucho más su uso. Sin embargo, la proyección de estructuras no se detiene y el desarrollo de las mismas es cada vez más acelerado; en muchas obras, se hace necesaria la obtención de altas resistencias, por requerimientos de proyecto o por rapidez de construcción.

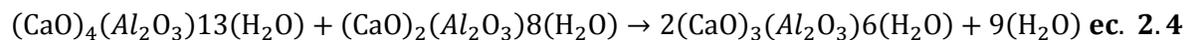
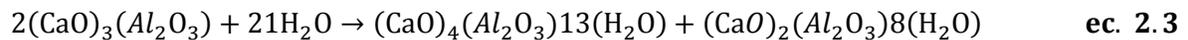
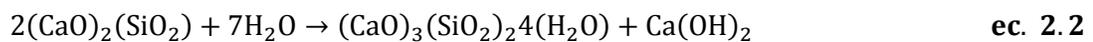
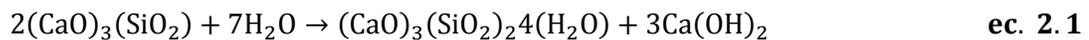
Las características del cemento pueden ser modificadas con la adición de algunos compuestos como escoria el cual al enfriarse bruscamente por inmersión en agua y posteriormente molido, actúa como cemento; y puzolanas, siendo estas últimas materiales silicios o alúmino-silicios que por sí solos no poseen características cementantes pero al ser molidos finamente y en presencia de humedad las adquieren. La escoria puede ser más de un 50% de la composición total del cemento, mientras que las puzolanas varían de un 15 al 30%.

Algunas de las características transmitidas son:

- Reducción del calor de hidratación.
- Fortalece la capacidad de resistir ataques químicos.
- Disminuye la filtración de cloruros.
- Producen un desarrollo más lento de las resistencias mecánicas.

2.1.2 Hidratación del cemento

La pasta de cemento es el resultado de una serie de reacciones de hidratación que tiene lugar cuando una cantidad determinada de cemento se mezcla con una cantidad limitada de agua. Según Bishop (2001), las reacciones más importantes que ocurren son (Ver Ecuaciones 2.1; 2.2; 2.3 y 2.4):



Estas reacciones de hidratación comienzan inmediatamente, incluso de modo violento, disminuyendo su actividad en un corto período de tiempo. Posteriormente, la velocidad de hidratación experimenta un nuevo incremento, seguido ya por el fraguado de la pasta, en donde la movilidad del sistema hasta ese momento plástica, se pierde. Este esquema así descrito puede ser visualizado en la Figura 2.2 que representa la evolución calorífica respecto al tiempo del proceso de hidratación del cemento Portland.

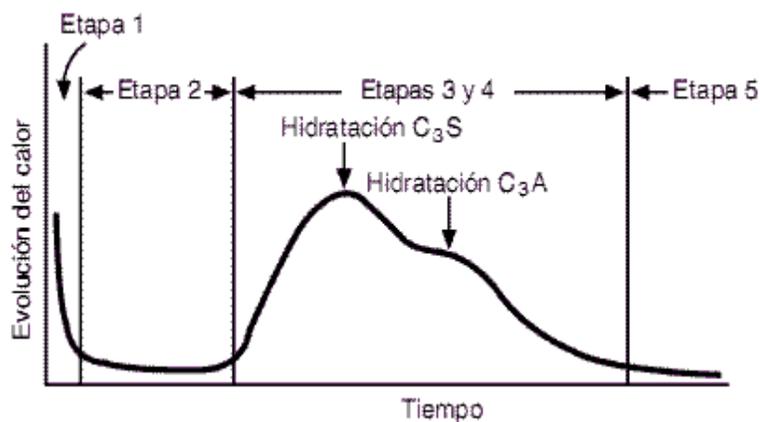


Figura 2.2 Evolución del calor en la hidratación del cemento. (Maroto, et al. 1989)

El desarrollo de la estructura de los productos de hidratación se puede dividir en tres etapas fundamentales:

- **Etapla inicial:** el foco de actividad está fundamentalmente concentrado en la superficie de los granos de cemento y en el agua de mezcla más cercana a estas superficies. La disponibilidad local de yeso impregnado sobre la superficie del cemento, junto con alguna exposición superficial de C3A, puede hacer que la primera respuesta reconocible de la hidratación sea la formación de una película amorfa de composición próxima a la de AFt (ettringita). Así mismo, en esta etapa se inicia la hidratación de los silicatos cálcicos anhidros y el desarrollo del gel C-S-H.
- **Etapla intermedia:** los productos de hidratación se depositan en el interior de los espacios inicialmente rellenos de agua, y comienza a conformarse una estructura coherente. (Ver Figura 2.3).
- **Etapla final:** el esqueleto estructural se rellena con productos de hidratación que provienen del interior de las fases de cemento originales. (Maroto et al., 1989)

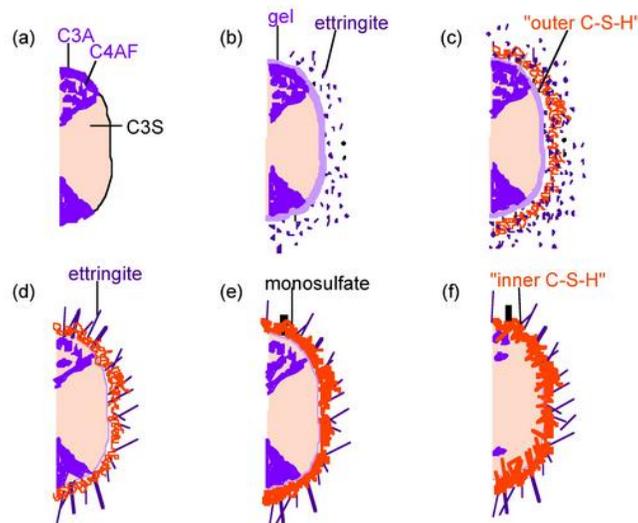


Figura 2.3 Esquema de la hidratación del cemento. (Bishop, 2001)

Las dos primeras etapas se dan durante las primeras horas de hidratación, mientras que la última comprende la mayoría del período real de hidratación activa.

2.1.3 Microestructura de la pasta de cemento

Según Maroto et al. (1989), la pasta de cemento es el resultado directo de la hidratación del cemento Portland con una cantidad determinada de agua. Los elementos microestructurales de la pasta de cemento son fases sólidas, poros y agua.

- **Fases sólidas en la pasta de cemento endurecida:** la hidratación del cemento Portland origina diferentes formas morfológicas de silicatos cálcicos hidratados (gel de C-S-H), hidróxido de calcio (CH), ettringita (Fase AF_t), monosulfoaluminato hidratado (Fase AF_m), y ocasionalmente cantidades de otras fases.
 - ✓ **Fase C-S-H:** esta fase constituye entre un 50-60% del volumen de sólidos en una pasta de cemento Portland completamente hidratada, siendo el compuesto que aporta la mayor parte de las propiedades resistentes.
 - ✓ **Hidróxido cálcico:** son cristales, también conocidos como portlandita, constituyen el 20-25% del volumen de sólidos en la pasta hidratada. Sus cristales se presentan muy definidos con formas planas y hexagonales. Su elevada solubilidad en medios acuosos puede tener efectos adversos sobre la durabilidad.
 - ✓ **Fases AF_t y AF_m:** suponen entre un 15-20% del volumen de sólidos en la pasta de cemento. En las primeras etapas del proceso de hidratación se produce la formación de la fase AF_t, denominada ettringita, que se presenta en forma de agujas prismáticas. En condiciones determinadas, puede transformarse en monosulfoaluminato (AF_m) que se manifiesta en forma de cristales hexagonales. Su presencia hace a la mezcla vulnerable al ataque por sulfatos.

- **Poros de la pasta de cemento hidratada:** la pasta de cemento contiene varios tipos de poros. Estos pueden clasificarse en:
 - ✓ **Poros interlaminares en el C-S-H:** representa la anchura de los espacios interlaminares dentro del C-S-H.
 - ✓ **Poros capilares:** representan el espacio no relleno por los componentes sólidos de la pasta de cemento.
 - ✓ **Poros de aire:** son generalmente de forma esférica. Pueden ser de dos tipos: los que se generan durante el amasado de la pasta fresca y los que se introducen con aditivos.

- **El agua en la pasta de cemento endurecida:** por la humedad ambiental y la porosidad de la pasta, ésta es capaz de retener una cierta cantidad de agua. La misma se puede presentar de distintas maneras:
 - ✓ **Agua capilar:** es el agua presente en los poros.
 - ✓ **Agua absorbida:** esta agua está ligada a la superficie del sólido y está por tanto bajo la influencia de fuerzas atractivas. Es la principal responsable de la retracción de la pasta de cemento.
 - ✓ **Agua interlaminar:** es el agua asociada a la estructura del gel C-S-H.
 - ✓ **Agua combinada químicamente:** esta agua forma parte integral de la estructura de varios de los productos de hidratación del cemento. Se pierde por descomposición de los productos a los que está ligada.

2.2 Puzolanas

En la Norma Venezolana COVENIN 3135 (1994), se define puzolana al producto natural que, finamente molido, es capaz de fijar cal a temperatura ambiente, en presencia de agua, formando compuestos con propiedades hidráulicas. Por extensión, el término

puzolana se aplica también a otros productos naturales o artificiales que tiene propiedades análogas, tales como la tierra de diatomeas, las arcillas activas, las cenizas volantes u otras.

Para el código ASTM (1992), 618-78, las puzolanas son materiales silíceos o alúmino-silíceos los cuales por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

2.2.1. Clasificación de las puzolanas según su origen

- **Puzolanas naturales.**

Entre las puzolanas de origen natural encontramos rocas de origen volcánico: cenizas volcánicas, piedra pómez, tobas, entre otras. Algunas arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava. Y otras rocas sedimentarias tales como; Diatomita, Trípoli y Opoca. (Roskovic, 2005).

- **Puzolanas artificiales.**

Las puzolanas artificiales son productos derivados y desechos, por una parte, de la industria como: la escoria de fundición, el humo de sílice, las cenizas volantes de las siderúrgicas y los catalizadores gastados CCF. Por otra parte, la ceniza de residuos agrícolas como: cascarilla de arroz, hoja de maíz, bagazo y la paja de la caña de azúcar, la concha del café y trigo. (Roskovic, 2005).

2.2.2. Índice de actividad puzolánica

La Norma Venezolana COVENIN 3135 (1994), define al índice de actividad puzolánica de morteros en los siguientes términos: es un índice que mide la actividad de las puzolanas en base a la resistencia a compresión de las mezclas conteniendo cemento hidráulico y arena normalizada, con y sin puzolana.

En este Trabajo Especial de Grado el índice de actividad puzolánica estará definido como la relación de resistencia a compresión del material puzolánico y la de un mortero a base de cemento Portland. Generalmente se especifica que dicho índice no debe ser menor a 0,75.

2.3 Descripción general del proceso de craqueo catalítico fluidizado

El proceso de Craqueo Catalítico Fluidizado (CCF y sus siglas en inglés FCC) 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 gastado o usado 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. (García, 2000).

2.4 Importancia de las unidades de craqueo catalítico fluidizado

La unidad de CCF ocupa un lugar muy importante 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 carga de olefinas livianas a las unidades de alquilación, a unidades petroquímicas y como fuente de gas licuado de petróleo (GLP) para el uso casero.

El proceso de craqueo catalítico fluidizado es de relativa 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 (Grace, 1996).

2.5 Catalizador gastado de craqueo catalítico

El craqueo catalítico es un proceso 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 también, el de producir compuestos aromáticos, así como benceno y tolueno a partir de naftas seleccionadas (Domone, 2007). El catalizador usado para este proceso de craqueo es un material fino conformado por una zeolita tipo Y, la cual es un aluminosilicato cristalino y microporoso constituido por tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ (Ver Apéndice B). 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 (Agámez et al., 2006) (Ver Figura 2.4).

Durante el uso de estos catalizadores en las unidades de craqueo, parte de ellos (ECAT) llamados catalizadores de equilibrio son retirados por tener baja actividad y sustituidos por nuevos catalizadores; y otra parte (EPCAT) llamados catalizadores de precipitadores electrostático porque se recogen en unidades que llevan el mismo nombre, (García et al., 2006).

Los estudios realizados sobre materiales fabricados con este subproducto han revelado que no son peligrosos, pues cumplen con los requisitos medioambientales exigidos (Furimsky, 1996; Su et al., 2000).

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 (Grace, 1996).



Figura 2.4 Catalizador gastado de craqueo catalítico CCF. (Fuente propia)

2.6 Mortero

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes, que resultan de combinar arena y agua con un aglutinante tal como el cemento Portland y otros. Generalmente se utiliza para obras de albañilería, como material de agarre, revestimiento de paredes, entre otras. El mortero de cemento Portland es un mortero en el que se utiliza cemento como conglomerante. La falta de trabajabilidad de los morteros puede corregirse añadiendo aditivos que sean plastificantes. También pueden mejorarse con la adición de otro tipo de materiales más corrientes, como es el caso de la cal, o modificando la dosificación del mortero (Bastidas, 2006).

2.6.1 Componentes del mortero

Es necesaria para la preparación de mezclas de morteros la conjugación en ciertas proporciones de los elementos definidos a continuación:

- **Arena:** se pueden utilizar arenas de río o de machaqueo, incluso mezclas de ambas. La arena debe carecer de materias orgánicas que alteren las propiedades del mortero. En estado natural, o después de lavadas deberán cumplir las siguientes condiciones: la forma de los granos será redonda o poliédrica, rechazándose las arenas cuyos granos tengan forma de laja o acícula, se limitará el contenido en finos, el contenido total de materias perjudiciales (mica, yeso, feldespatos descompuestos, piritas) no será superior al 2% (Porrero et al., 2009). La resistencia del mortero depende en gran medida de la distribución granulométrica de la arena, debiendo utilizar arenas que presenten la mayor compacidad posible, es decir, que los huecos que dejen los granos mayores, se rellenen con los granos inferiores y así sucesivamente. Para realizar los ensayos en morteros, se debe utilizar una arena normalizada que cumpla con las especificaciones de la norma COVENIN 2503-90 “Arena normalizada para ensayos de cemento. Requisitos”. (Ver Figura 2.5 (izq); Figura 2.5 (der) y Apéndice C).



Figura 2.5 (izq.) Saco de arena de Ottawa (der.) Tara con arena de Ottawa. (Fuente propia)

- **Agua:** es imprescindible en las etapas de la elaboración del mortero: mezclado, fraguado y curado. El agua de mezclado ocupa normalmente entre 15 y 20% del volumen de mortero fresco y, conjuntamente con el cemento, forman un producto coherente, pastoso y manejable, que lubrica y adhiere el agregado. Simultáneamente esta agua reacciona químicamente con el cemento, hidratándolo y produciendo el fraguado en su acepción más amplia, desde el estado plástico inicial, pasando por lo que llamamos endurecimiento, hasta el desarrollo de resistencias a largo plazo. Por otra parte, el agua de curado es necesaria para reponer la humedad que se pierde por evaporación luego que el mortero ha sido colocado, compactado y alisado en su superficie. Tanto el agua de mezclado como el agua de curado deben estar libres de contaminantes que puedan perjudicar el fraguado o que reaccionen negativamente, en estado fresco o en estado endurecido (Bastidas, 2006). De acuerdo con la Norma COVENIN 2385-2000 “Concreto y mortero. Agua de mezclado. Requisitos”, el agua potable es siempre apta para la elaboración de morteros por sus características en cuanto a cantidades presentes de sólidos en suspensión, valores de pH, sólidos disueltos, materia orgánica, cloruros y sulfatos. (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Impurezas tolerables en el agua de mezclado de concreto y mortero (COVENIN 2385:2000)

Impurezas	Contenido máx en ppm
Sólidos disueltos	5000
Cloruros	500
MO por consumo de oxígeno	250
pH	de 5 a 7,5

- **Aditivos:** son sustancias o materiales añadidos, antes o durante la mezcla del mortero, en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento (su proporción no supera el 5% en masa del contenido de cemento). Su función es aportar a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, determinadas modificaciones bien definidas y con carácter permanente. En el caso de utilizar aditivos debe comprobarse que no afecten de forma desfavorable a la calidad del mortero y a la durabilidad.
- **Cemento:** es un material con propiedades adhesivas y cohesivas las cuales dan la capacidad de aglutinar otros materiales para formar un todo, sólido y compacto (Gallo, 1999 en Bastidas, 2006). El cemento Portland utilizado en la fabricación de morteros debe cumplir con lo especificado en la Norma COVENIN 28 “Cemento Portland Especificaciones”. Los cementos Portland por lo general se fabrican en cinco tipos cuyas propiedades se han normalizado sobre la base de las especificaciones de Normas para el Cemento Portland según ASTM. (Ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Requisitos físicos del cemento (COVENIN 28:2003)

Requisitos	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Método de ensayo COVENIN*
Finura						
Superficie específica. m ² /kg						
Ensayo de permeabilidad al aire (Blaine):						
Valor promedio, mínimo	280	280		280	280	487
Valor mínimo, cualquier muestra	260	260		260	260	
Estabilidad del volumen: (%) Máx.	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	491
Tiempo de fraguado ensayo de vicat:						
Tiempo inicial (min)	>45	>45	>45	>45	>45	493
Tiempo final (min)	<480	<480	<480	<480	<480	
Calor de hidratación:						
Valor máximo a los 7 días, (Kj/Kg)	---	290	---	250	---	495
Valor máximo a los 25 días, (kj/Kg)	---	---	---	290	---	
Contenido de aire en morteros. (Opcional): % Máx.	12	12	12	12	12	496
Resistencia a la compresión:						
Mpa(kg/cm²)						
1 día	---	---	>12,4 (126)	---	---	484
3 días	>10,0 (100)	>8,3 (85)	>24,1(246)	---	>8,3 (85)	
7 días	>17,0 (170)	>14,7 (150)		>6,9 (70)	>15,2 (155)	
28 días	>27,4 (280)	>24,5 (250)		>17,2 (175)	>20,7 (212)	
Nota: En Venezuela es costumbre tomar la fecha de 28 días como dato de referencia.						
* Se indica el número de la Norma Venezolana COVENIN en la cual se describe el método de ensayo aplicable.						

2.7 Glosario de Términos

Actividad puzolánica: se refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la cual ocurre esta reacción (Roskovic, 2005).

Aditivos: Materiales diferentes al cemento, agregado o agua que se incorporan en pequeñas cantidades al concreto, antes, o durante su mezcla, para modificar algunas de las propiedades sin perjudicar la durabilidad (Norma COVENIN 273:98).

Arena normalizada: arena de sílice que se produce procesando el material obtenido de la explotación de los depósitos abiertos de cuarcita próximos a Ottawa, Illinois. Está compuesta fundamentalmente por granos de cuarzo casi puro naturalmente redondeados; graduada entre los tamices U.S. Standard 600 μm (No. 30) y 150 μm (No. 100). Se emplea en morteros que se usan para ensayar cementos hidráulicos (Norma COVENIN 2503:90).

Calor de hidratación: Es la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento liberado durante el proceso de hidratación, debido a reacciones físico-químicas en un período definido de tiempo (Norma COVENIN 483:92).

Consistencia normal: es la consistencia de una pasta de cemento cuando la Aguja de Vicat penetra en ella 10 ± 1 mm, a los 30 s de haber sido liberada (Norma COVENIN 494:94).

Densidad real: Es la masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del material excluyendo sus poros saturables y no saturables (Norma COVENIN 273:98).

Diseño de Mezcla: Procedimiento mediante el cual se calculan las cantidades de todos los componentes de una mezcla de concreto para alcanzar el comportamiento deseado (Porrero et al., 2009).

Dosificación: Establece las proporciones apropiadas de los materiales que componen un concreto, a fin de obtener la manejabilidad, resistencia y durabilidad requeridas, o bien para obtener un acabado o adherencia correctos (Porrero et al., 2009).

Durabilidad: Capacidad del concreto de resistir la acción de factores que pueden quitarle su capacidad de servicio, tales como, el helado-descongelado, el mojado-secado, el calor y enfriamiento, agentes químicos, entre otros (Porrero et al., 2009).

Fraguado: Es el resultado de un proceso de hidratación por el cual un aglomerante hidráulico adquiere una mayor resistencia a la penetración, la que se pone en evidencia por ensayos tipificados (Norma COVENIN 483:92).

Granulometría: Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado que se determina por análisis de un conjunto de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas (las cuales gradualmente varían de tamaño). La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto (Porrero et al., 2009).

Puzolana: Materia esencialmente silicosa que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice - alúmina) capaces, a la temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas (Norma COVENIN 483:92).

Relación agua/cemento: También conocida como a/c , expresa la relación que existe entre las masas de agua (excluyendo el agua absorbida por los agregados), y de cemento en una mezcla de concreto e influye en la resistencia final del concreto. Dado que el peso del agua utilizada siempre es menor que el peso del cemento, el guarismo resultante es menor que la unidad. Una relación a/c baja conduce a un concreto de mayor resistencia que una relación alta. Pero entre más alta es la relación, el concreto se vuelve más trabajable. (Norma COVENIN 273:98).

Resistencia: Término para asignar la habilidad de un material para soportar deformaciones o roturas por fuerzas externas (Porrero et al., 2009).

Retracción: Pérdida de volumen debido a la absorción del agua por parte del cemento (Porrero et al., 2009).

Tamaño máximo: Es la abertura del tamiz de malla menor a través del cual puede pasar como mínimo el 95% del agregado (Porrero et al., 2009).

Tiempo de fraguado: es el tiempo necesario para que la aguja de Vicat penetre 25 mm o menos en una pasta de cemento de consistencia normal (Norma COVENIN 493:92).

2.8 Presentación de la empresa que proporciona el CCF

Según el portal web de la empresa Petróleos de Venezuela S.A., disponible en www.pdvsa.com, PDVSA es la corporación estatal de la República Bolivariana de Venezuela, creada en 1975, que se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, actuando bajo los lineamientos de los Planes de Desarrollo Nacional y de acuerdo a las políticas, directrices, planes y estrategias para el sector de los hidrocarburos, dictadas por el Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo.

A partir de Enero de 1998 la corporación PDVSA Petróleo y Gas adopta su actual estructura organizativa, dividiéndose en tres grandes empresas funcionales de negocios: PDVSA Exploración y Producción, PDVSA Manufactura y Mercadeo y PDVSA Servicios; responsables de ejecutar la actividad operativa referente a los hidrocarburos. La división de Manufactura y Mercadeo está a cargo de las actividades de refinación de crudos, así como de la manufactura de productos y gas natural, su comercialización y suministro para el mercado nacional e internacional, encontrándose dentro de esta división el Centro de Refinación Paraguaná (CRP), conformado por tres refinerías: Amuay, Cardón y Bajo Grande (Ver Figura 2.6).

La empresa Petróleos de Venezuela S.A. está conformada por 24 refinerías, 18 de ellas en el exterior y 6 en el país; con una capacidad de refinación mundial de 3,3 millones de barriles diarios.

PDVSA ocupa las siguientes posiciones de acuerdo con un estudio comparativo publicado por Petroleum Intelligence Weekly (PIW) el 6 de diciembre de 2010: cuarta empresa petrolera a nivel mundial, primera a nivel latinoamericano, tercera en producción de petróleo, cuarta en capacidad de refinación, octava en reservas probadas de gas y octava en ventas. Así mismo, según el Balance de la Gestión Social y Ambiental de PDVSA y sus Filiales del año 2011 presentado en su página web, Venezuela es el país con las mayores reservas probadas de petróleo del planeta (297 mil 571 millones de barriles).

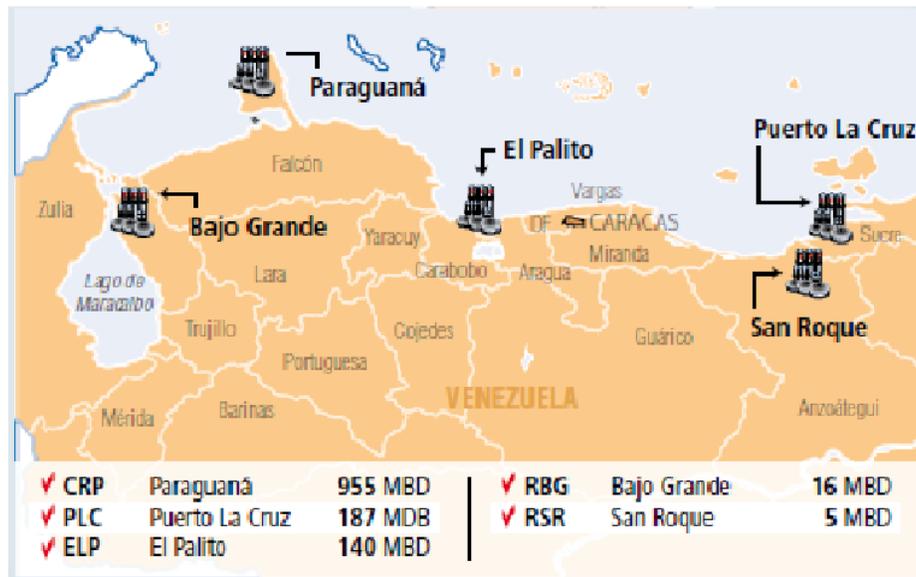


Figura 2.6 Ubicación de las refinerías del país. (www.pdvsa.com)

2.9 Generalidades sobre el Centro de Refinación Paraguaná

Según el portal web de la empresa Petróleos de Venezuela S.A., disponible en www.pdvsa.com, El Complejo Refinador de Amuay es una instalación para refinación de petróleo, que está ubicada en la costa occidental de la península de Paraguaná, municipio Los Taques, del estado Falcón, Venezuela. Actualmente pertenece a la empresa energética estatal Petróleos de Venezuela (PDVSA). Esta refinería de petróleo estaba ubicada entre las primeras cinco más grandes del mundo; sin embargo, su organización fue reestructurada en 1997, año en el que se unió con la Refinería Cardón, ubicada en la misma península y la Refinería Bajo Grande, en el estado Zulia, para integrar el Centro de Refinación de Paraguaná (CRP), considerado hoy día, uno de los más grandes del mundo.

El CRP tiene una capacidad nominal de 955 MBD (miles de barriles diarios), conformado por las Refinería Amuay con 645 MBD y Cardón con 310 MBD, ubicadas en la Península de Paraguaná, estado Falcón. Adicionalmente, se encuentra integrada la Refinería Bajo Grande, en el estado Zulia, con una capacidad de 16 MBD, destinada a la producción de asfalto.

El CRP cubre 67% de la demanda de combustibles a nivel nacional, incluyendo la transferencia de componentes para mezclas y productos terminados al resto de las refinerías que conforman el circuito nacional.

2.10 Consumo de catalizadores en las refinerías del país.

Los procesos catalíticos han sido la clave para el desarrollo de la industria de la refinación a nivel nacional. Según la publicación de Morales (2010) presentada en la página web www.oei.es/ve, los catalizadores de craqueo catalítico y los de hidrotratamiento son los de mayor consumo en el país. (Ver Gráfico 2.1)

Tomando en cuenta que las mayores reservas de petróleo se encuentran en la Faja Petrolífera de Venezuela, y este material es del tipo pesado, es factible estimar que la demanda de catalizadores se incrementará principalmente en hidrorrefinación, CCF e hidrocrqueo, ya que los mismos procesarán cargas cada vez más pesadas y los requerimientos de calidad aumentarán aún más. Por otra parte, se prevé una reducción en los catalizadores de reformación, debido a que las limitaciones en aromáticos son cada vez más severas. Este hecho evidentemente, demuestra el papel estratégico y económico que representan los catalizadores para el país.

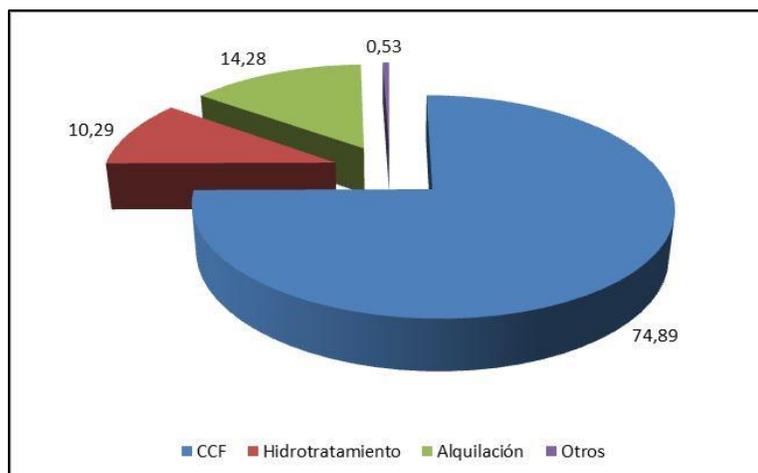


Gráfico 2.1 Consumo estimado de catalizadores para refinerías nacionales de PDVSA. (Morales, 2010)

2.11 Inversión y producción de cemento en Venezuela.

En el Informe de Gestión 2011 del Minvih, publicado en el portal web www.venezueladeverdad.gob.ve, se afirma que durante el 2011 hubo un aumento del 10% en la producción de cemento (Ver Tabla 2.3). Un informe publicado el 07.06.12 en el mismo sitio web, afirma que el Gobierno Bolivariano ha invertido mil 151 millones de dólares para fortalecer la producción de cemento en el país, la cifra de 4.949.300.000 bolívares.

Según la nota “la inversión supera en mil por ciento lo invertido por los anteriores dueños (trasmacionales), antes de que el Estado recuperara la industria cementera en el año 2008”. Desde esa fecha el 100% de lo producido se destina al mercado interno. Según esos datos, la capacidad instalada de producción nacional de cemento es de 9.09 millones de toneladas, las cuales podrían llegar a 10.09 millones de toneladas con la inauguración de la Planta Cerro Azul.

Durante el primer semestre de 2012, la producción nacional de cemento se incrementó en 9.4% con respecto al primer semestre de 2011. Se estima cerrar el año con una producción total de 8.3 millones de toneladas (99.63% corresponde a cemento gris mientras que el restante 0.36% a cemento blanco); manteniendo un consumo de cemento per cápita de 286 Kg/hab/año. Para 2013, Venezuela aspira a elevar a 18% la capacidad instalada de producción de cemento; es decir, a 10,69 millones de toneladas (Ver Figura 2.7).

Las plantas cementeras del sector privado en proceso de estatización (Ver Figura 2.8):

- Catatumbo-Planta Catatumbo, ubicada en el estado Zulia.

Las plantas cementeras del sector público son (Ver Figura 2.8):

- Fábrica Nacional de Cemento (FNC)-Planta Táchira, ubicada en el estado Táchira.

- FNC-Planta Ocumare, ubicada en el estado Miranda.
- Industria Venezolana de Cemento (Invecem). Planta Cumarebo, ubicada en el estado Falcón.
- Invecem. Planta San Sebastián de Los Reyes, ubicada en el estado Carabobo.
- Cemento Andino-Planta La Ceiba, ubicada en el estado Trujillo.
- Venezolana de Cementos (Vencemos). Planta Mara, ubicada en el estado Zulia.
- Vencemos-Planta Pertigalete, ubicada en el estado Anzoátegui.
- Se cuenta, además, con la Terminal de Molienda Vencemos-Guayana, ubicada en el estado Bolívar.
- Se espera por la inauguración de la Planta de Cemento Cerro Azul (Monagas), para llegar a diez plantas de cemento en Venezuela.

Tabla 2.3 Cuadro comparativo entre la producción y venta de cemento en Venezuela para los meses Junio 2011 y Junio 2012 (www.venezueladeverdad.gob.ve)

Descripción	Producción (Ton)			Ventas (Ton)		
	jun-11	jun-12	%Variación	jun-11	jun-12	%Variación
Venezolana de Cementos	274812	318021	15,72	284690	322426	13,26
INVECEM	214737	246000	14,56	211177	246000	16,49
FNC	65822	107353	63,10	79283	107600	35,72
Cemento Andino	35984	38304	6,45	41784	38970	-6,73
Cementos Catatumbo	44006	49476	12,43	44006	53478	21,52
TOTAL	635361	759154	19,48	660940	768474	16,27

*Nota: Los valores presentados de las ventas de cemento contemplan adiciones realizadas al clinker.

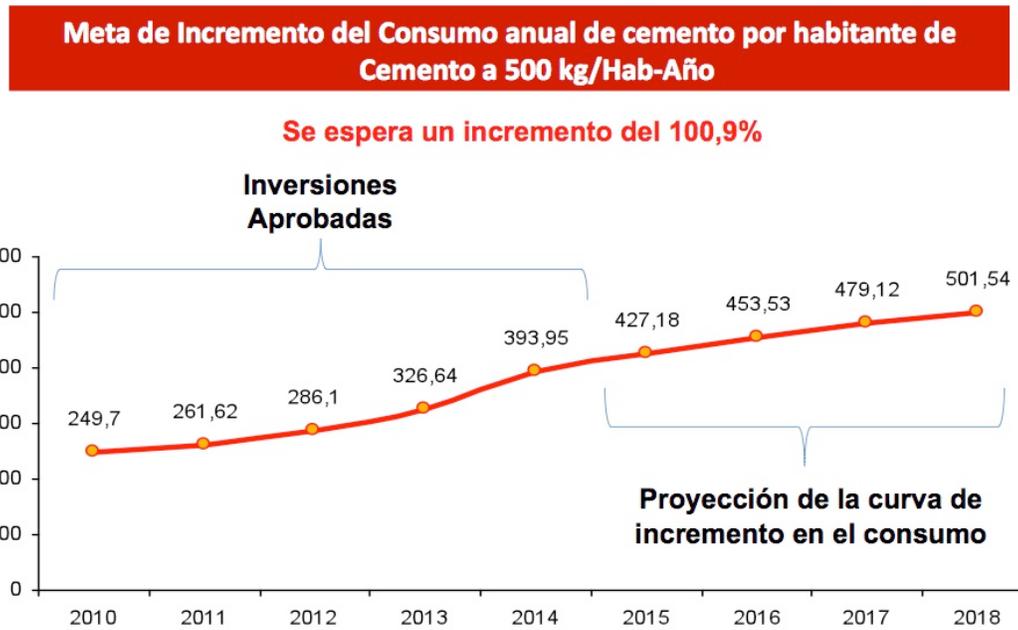


Figura 2.7 Consumo anual de cemento por habitante en Venezuela. (www.venezueladeverdad.gob.ve)

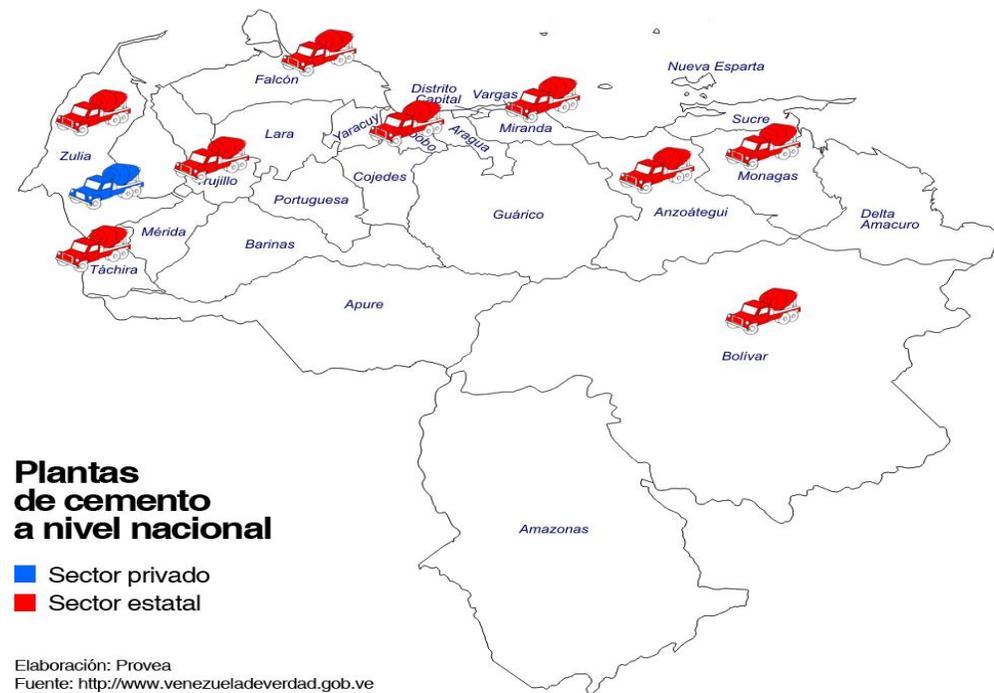


Figura 2.8 Ubicación de las Plantas de Cemento en Venezuela. (www.venezueladeverdad.gob.ve)

2.12 Antecedentes

2.12.1 Actividad puzolánica y propiedades mecánicas de los CCF

Pacewska et al. (1998) compararon la fijación de cal de varias puzolanas en pastas de cemento, entre ellas el CCF, el humo de sílice (HS) y las cenizas volantes (CV). Concluyeron que el fraguado se veía acelerado por la presencia de las puzolanas, destacándose el CCF. En cuanto al porcentaje de cal fijada, encontraron que a los 28 días de curado este parámetro fue similar para el HS y el CCF. En el caso de las resistencias mecánicas, las pastas adicionadas con CCF mostraron mejoras de resistencias a partir de los siete días de curado, siendo superiores a las demás pastas estudiadas.

Pacewska et al. (2000) también estudiaron la influencia de diferentes porcentajes de sustitución del CCF por cemento y dedujeron que una pequeña adición de CCF entre el 5-10% de sustitución de cemento, actuó como acelerador del sistema. Sin embargo, para adiciones superiores de catalizador, de más de un 10%, el calor liberado después de 72 horas disminuyó, probablemente porque se formaban menores cantidades de fase CSH. También se han realizado estudios sobre la influencia del tamaño de partícula de los dos residuos generados en el proceso (ECAT y EPCAT).

Pacewska et al. (2002) determinaron, a partir de estudios de calorimetría, que si la sustitución de cemento por EPCAT estaba entre el 5-10 %, el proceso de hidratación se aceleraba; en cambio, para rangos superiores del 10% el calor liberado disminuía. En el caso de las muestras con ECAT el calor de hidratación fue menor. También hallaron que el material más fino (EPCAT) fijó más hidróxido de calcio, en comparación con el ECAT.

Payá et al. (2003) realizaron un estudio comparativo sobre las características fisicoquímicas de cinco residuos de catalizadores de craqueo catalítico gastados suministrados por diferentes empresas. Tras analizar todos los aspectos se pudo observar que todas las composiciones químicas eran muy similares y no existen diferencias apreciables entre los diferentes residuos. En todas las muestras se han encontrado elementos de la familia de los lantánidos y la pérdida al fuego (P.F) fue inferior al 1% en peso.

2.12.2 Hidratación del CCF en pastas de cemento Portland

Payá et al. (2003), para sistemas cal-catalizador, han encontrado como principales productos de hidratación el silicato cálcico hidratado (CSH), aluminatos cálcicos hidratados (CAH) y silicoaluminatos cálcicos hidratados (CASH) de diferentes composiciones, siendo estos productos muy similares a los hallados en pastas con MK. Por otro lado, en los sistemas cemento-CCF reportan los mismos productos.

Borrachero et al. (2002) evaluaron las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica de cemento portland adicionado con CCF molido, denotando que la reactividad del CCF es elevada y que los efectos de tipo puzolánico y de aceleración en la hidratación del cemento son evidentes en tiempos muy cortos de curado. Por su parte, Jung-Hsiu Wu et al. (2003) y Pacewska et al. (2002) afirman que en los sistemas cemento – CCF se produce más C-S-H y menos hidróxido de calcio.

2.12.3 Durabilidad de morteros y concretos adicionados con CCF

En cuanto a la durabilidad de morteros y concretos adicionados con CCF, se han hecho estudios del desempeño frente al ataque de sulfatos, carbonatación y cloruros. A continuación se ofrece una breve descripción de los resultados obtenidos.

Pacewska et al. (2000) elaboraron morteros con sustitución de cemento por 10 y 20% de CCF y los sometieron a un ataque con sulfatos y cloruros. Los autores encontraron que para los tiempos de contacto estudiado y las concentraciones escogidas de cloruros y sulfatos, el efecto de estos dos reactivos fue similar, apreciándose un descenso en la resistencia a compresión. Los morteros que contenían el CCF en un 20% prácticamente no se vieron afectados por los medios agresivos. Más adelante (2002) concluyeron que el medio con cloruros es más agresivo que el medio sulfatado para morteros adicionados con CCF.

Por su parte, Zornoza et al. (2009) sugieren que el residuo puede ser usado en estructuras de concreto reforzado expuestas al ataque del ión cloruro; ya que se comprobó que la mayor proporción de aluminatos que ofrece el CCF produce una mayor capacidad de

fijación de cloruros en la matriz cementante de los morteros que incorporan dicho producto, lo cual disminuye el coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario. En sus ensayos realizados, también se midió la velocidad de corrosión de aceros en condiciones de carbonatación y se observó que la incorporación de hasta un 15% de CCF no afectaba de forma significativa a la corrosión de los aceros cuando se mantenían relaciones a/mc (agua/material cementante) por debajo de 0,5.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

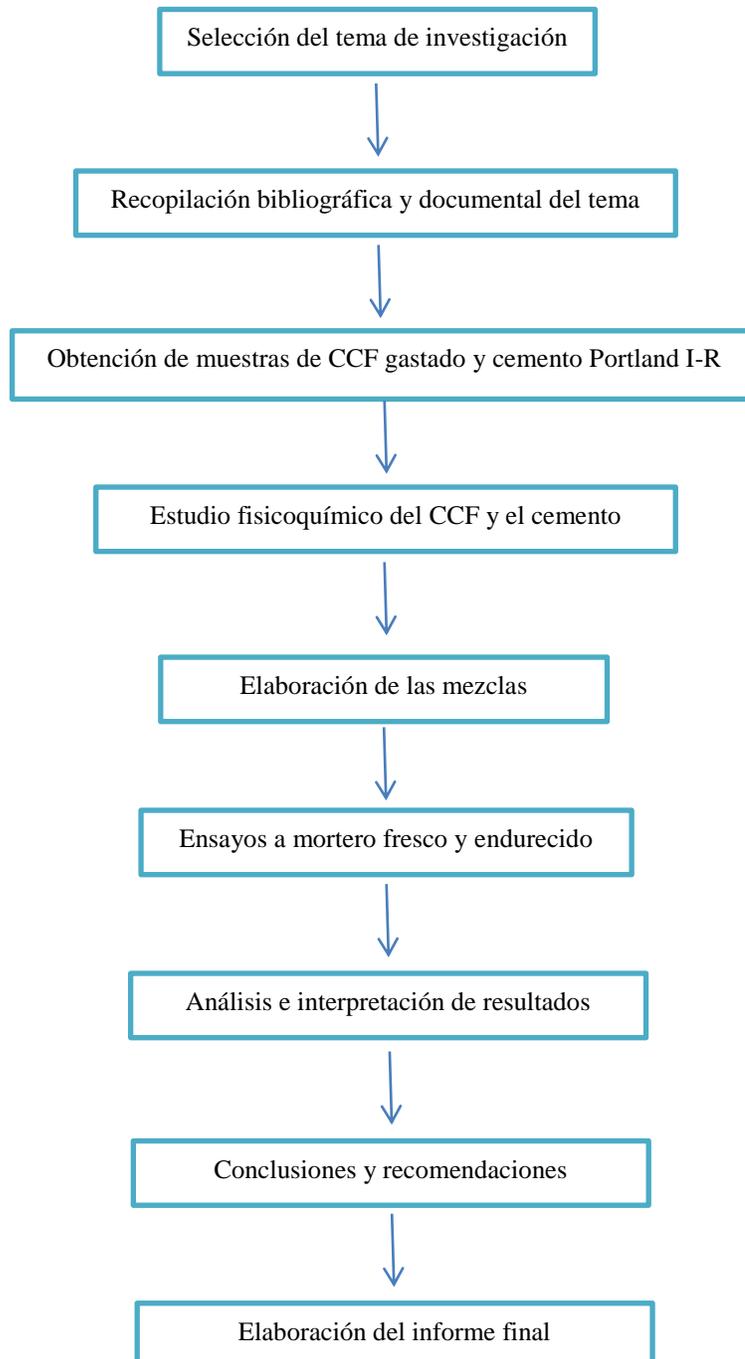
El presente Trabajo Especial de Grado corresponde a una investigación experimental, en el cual se estimará la actividad puzolánica de los residuos de catalizador de craqueo catalítico (CCF) procedentes de reactores de la refinería de Amuay, cuando éste es utilizado como reemplazo del material cementante, y se valorará su posible utilización conjunta con el cemento Portland I-R a través de análisis fisicoquímicos de las muestras que permitan determinar si presentan cambios apreciables en sus propiedades que impidan su uso como un solo material.

También se desarrollarán diversas mezclas de morteros y pastas con los catalizadores gastados CCF con el objeto de evaluar su resistencia, para luego contrastarlo con la mezcla patrón tradicional, y así verificar que cumpla con los requerimientos de usos. Para ello, se realizarán diferentes ensayos de laboratorio, estipulados en la normativa venezolana así como contenidos en el manual de Ensayos de Laboratorio y Especificaciones de agregados de concreto del Comité Conjunto del Concreto Armado (1976) y el American Concrete Institute (ACI).

En el estudio del uso de residuos de craqueo catalítico (CCF) en la preparación de morteros modificados para elementos estructurales y no estructurales, se plantea el siguiente flujograma de trabajo. El cual trata primero la recopilación de la información, luego determinar las propiedades físicas y químicas de los materiales, seguidamente la elaboración de los morteros modificados con cada uno de los residuos del catalizador, conjuntamente con la realización de los diversos ensayos a dichos morteros. Estas etapas abarcan todo el desarrollo de la investigación y permitirán lograr los objetivos propuestos.

Flujograma para el estudio del comportamiento de los CCF como adición al cemento

(Fuente: Elaboración propia)



Fase I: Recopilación bibliográfica del tema

Durante esta etapa, se localizaron todas las fuentes de información posibles tanto primarias como secundarias, que tuvieran relación directa. Se recurrió a la recopilación de datos, a través de la consulta de textos, tesis y artículos que ayudaran a describir los residuos de craqueo catalítico en medio fluidizado (CCF). Así mismo, se revisaron las normas venezolanas que rigen la construcción de edificaciones y describen los ensayos a elementos estructurales, las cuales proporcionaron las bases teóricas de los experimentos a realizar en el laboratorio.

Fase II: Obtención de muestras de CCF gastado y cemento Portland I-R

El catalizador de craqueo catalítico gastado (CCF), del tipo ECAT, procedente de la refinería de Amuay fue el material de adición utilizado para reemplazar el cemento Portland I-R en las mezclas de pasta y mortero realizadas en esta investigación. El residuo fue recogido de las unidades de craqueo de la refinería y tratado por el Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (Intevep, ubicado en Los Teques). Luego, el Centro Nacional de Tecnología Química (CNTQ, ubicado en la Base Aérea Generalísimo Francisco de Miranda, La Carlota, Caracas) suministró al autor dos sacos de este material para la realización de este proyecto el día 28 de agosto.

El cemento utilizado en la investigación es del tipo I-R, procesado el 13 de agosto por la Fábrica Nacional de Cemento (FNC), Planta Ocumare, ubicada en el estado Miranda. Se suministró al autor dos sacos de este material por el Laboratorio de Control de Calidad de la FNC, Concretera San Antonio del Valle (Caracas).

Fase III: Estudio de las propiedades fisicoquímicas de los residuos CCF y del cemento Portland Tipo I-R

- 1. Composición química:** el análisis de la composición química se llevó a cabo empleando la técnica de espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-EA); la cual permite determinar los tenores de óxidos que componen químicamente cada una de las muestras. El procedimiento consiste en una fusión alcalina y la pérdida al fuego se determina por calcinación. El ensayo se realizó con el equipo Horiba Ultima 2 ICP (Ver Figura 3.1), propiedad del CAIC (Centro de Asistencia a la Industria Cerámica, ubicado en las instalaciones del Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, Km 8, carretera Panamericana). Cada muestra fue obtenida por cuarteo, para realizar fusión alcalina con Metaborato de Litio a razón de 1:6 respectivamente, dilución con HNO₃ al 10% y aforado en balón de 200 ml.



Figura 3.1 Equipo Horiba Ultima 2 ICP para análisis químico (Fuente: Propia)

- 2. Difracción de rayos X:** para la caracterización mineralógica se hace un análisis por Difracción de Rayos X (DRX) empleando un difractómetro modelo Philips PW1840 Based, propiedad del CAIC, con adquisición de datos electrónicos (Ver Figura 3.2); donde se ha utilizado la radiación K α del Cu y un monocromador

secundario (filtro de Níquel), que elimina la radiación $K\beta$ de Cu. La intensidad y el voltaje del tubo generador de rayos X se ajustaron en todas las medidas a 22 mA y 40 KV, respectivamente. Se registran los difractogramas para el intervalo 2θ entre 10° y 80° , con un ángulo de paso de $0,02^\circ$, un tiempo de acumulación de 2 segundos y sensibilidad de 5000 C/s. Este ensayo permite determinar las diferentes fases cristalinas presentes en una muestra, a través de la incidencia y difracción de un haz de Rayos X. Cada muestra fue obtenida por cuarteo, se tomaron 2 g y se colocaron en el equipo en estado natural.

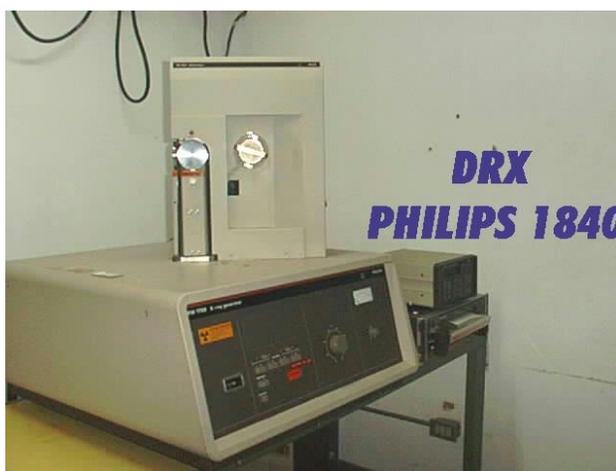


Figura 3.2 Difractómetro modelo Philips PW1840 (Fuente: Propia)

- 3. Análisis granulométrico:** las medidas de granulometría por difracción láser (ADL) se realizaron con un equipo Malvern Instruments, modelo Mastersizer 2000, propiedad del CAIC (Ver Figura 3.3). El rango del equipo es de 0,02 a 2000 micras. Las medidas se llevan a cabo en un medio acuoso y a las suspensiones se le aplica previamente un minuto de ultrasonidos, con la sonda propia del equipo, para disgregar posibles aglomerados de partículas. Se utilizó Poliacrilato de Sodio al 0,5% como dispersante de la muestra de CCF y etanol al 98% para la muestra de cemento.



Figura 3.3 Equipo granulométrico Mastersizer 2000 (Fuente: Propia)

- 4. Microscopía electrónica de barrido:** se realizaron los ensayos de microscopía electrónica empleando un equipo Hitachi S-2400, propiedad del laboratorio de Microscopía Electrónica de la Escuela de Ingeniería Metalurgia de la UCV (Ver Figura 3.4). La muestras fueron recubiertas en oro-paladio para facilitar la conductividad eléctrica de las mismas; dicho recubrimiento se realizó empleando el equipo Hitachi E-102, con un tiempo de exposición de 5 minutos. El microanálisis por EDS (Espectroscopía de dispersión de rayos X) se hace con un equipo Thermo Electron Corporation. El programa que permite adquirir las imágenes y realizar el análisis químico semi-cuantitativo fue Noran System Six.



Figura 3.4 Microscopio electrónico Hitachi S-2400 (Fuente: Propia)

5. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine: se basará en la norma COVENIN 487-1993: “Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad”. El procedimiento seguido se presenta a continuación:

- Se pesa una cantidad de muestra de $2,8954 \pm 0,0001$ g del material a ensayar (cemento o CCF). Dicho peso es obtenido de la calibración del equipo. Se utilizará una balanza digital Modelo: Explorer Pro, Marca: Ohaus, Rango: 100,0000 g, Resolución: 0,0001 g. (Ver Figura 3.5 (izq.))
- Se prepara la célula de permeabilidad colocando primero un disco perforado, encima de él se coloca un papel de filtro, luego se coloca la muestra y por último se coloca otro papel de filtro. (Ver Figura 3.5 (der.))
- Se comprime la muestra con el émbolo hasta que la cabeza se encuentre en contacto con la parte superior de la célula.
- Se gira el émbolo alrededor de 90^0 y se retira lentamente.
- La célula se conecta al tubo del manómetro a través de una junta cónica normalizada, la cual previamente se le coloca un gel para obtener una conexión hermética.
- Se extrae lentamente el aire en el brazo del manómetro conectado a la célula hasta que el líquido (mercurio) alcance la marca superior, y se cierra la llave completamente.
- Se hace funcionar el cronómetro cuando el menisco del líquido que está en el manómetro alcance la segunda marca contada desde arriba y se detiene cuando el fondo del menisco del líquido alcance la tercera marca. Se anota el intervalo de tiempo medido. (Ver Figura 3.6 (izq.) y Figura 3.6 (der))
- Para cada material se realizará por duplicado el ensayo para promediar los tiempos obtenidos.
- Se calcula la superficie específica del material con las siguientes fórmulas (Ver ec. 3.1 y ec. 3.2):

$$S = F * \sqrt{T} \quad \text{ec. 3.1}$$

$$F = \frac{S_s}{\sqrt{T_s}} \quad \text{ec. 3.2}$$

Donde:

S = Superficie específica de la muestra de ensayo (cm²/g).

F = Factor de calibración del aparato (Para este caso F= 431,6122 cm²/g/s^{1/2}).

Ss = superficie específica de la muestra normalizada (cm²/g).

Ts = Tiempo de la caída del manómetro para la muestra normalizada (s).

T = Tiempo de la caída del manómetro para la muestra de ensayo (s).



Figura 3.5 (izq.) Medición de la masa de cemento (der.) Material dentro de la célula de permeabilidad (Fuente propia)



Figura 3.6 (izq.) Aparato de permeabilidad Blaine (der.) Etiqueta de calibración del aparato de permeabilidad Blaine (Fuente propia)

6. Determinación de la finura por medio del tamiz # 325: se basará en la norma NVF 489-2006: “Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del tamiz COVENIN 45 μm (#325)”. El procedimiento seguido se presenta a continuación:

- Se pesa una cantidad de muestra de 10,0000 g del material a ensayar (cemento o CCF). Se utilizará una balanza digital Modelo: Explorer Pro, Marca: Ohaus, Rango: 100,0000 g, Resolución: 0,0001 g.
- Se coloca la muestra sobre el tamiz 45 μm (#325) limpio y seco, y debajo del mismo se coloca un recipiente para recoger el material pasante. (Ver Figura 3.7 (izq.))
- Con un pincel, se esparce la muestra sobre el tamiz hasta que no se observe paso de material al recipiente. (Ver Figura 3.7 (der))
- Se recoge el material retenido en el tamiz y se pesa.
- Se expresa el porcentaje de muestra retenida y el porcentaje de finos con las siguientes fórmulas (Ver ec. 3.3 y ec. 3.4):

$$\% \text{Ret} = \frac{W_{\text{ret}}}{W_m} * 100 \qquad \text{ec. 3.3}$$

$$\%Fin = 100 - \%Ret$$

ec. 3.4

Donde:

%Ret = Porcentaje de retenidos en la malla empleada a determinar.

%Fin = Porcentaje de finos del material.

Wm = Masa de muestra empleada (gramos).

Vret = Masa de muestra retenida en el tamiz (gramos).



Figura 3.7 (izq.) Colocación del material sobre el tamiz #325 (der.) Distribución del material con un pincel sobre el tamiz #325 (Fuente propia)

7. Determinación de la densidad por medio de un frasco de Le Chatelier: se basará en la norma COVENIN 492-1994: “Cemento Portland. Determinación de la densidad real”. El procedimiento seguido se presenta a continuación:

- Las muestras se secan en un horno por 24 horas a una temperatura de 60°.
- Se llena un frasco volumétrico de Le Chatelier con el medio suspensor (kerosina para la muestra de cemento y agua destilada para la muestra de

CCF), hasta una altura del cuello comprendido entre la marca cero (0) y la marca uno (1 ml) (Ver Figura 3.8).

- Se sumerge el frasco en el baño termorregulador a la temperatura ambiente hasta que el líquido alcance la temperatura del baño, momento en el cual se efectúa la primera lectura de volumen.
- Se pesa una cantidad de muestra de 60,00 g del material a ensayar (cemento o CCF). Se utilizará una balanza digital Modelo: Explorer Pro, Marca: Ohaus, Rango: 22000,00 g, Resolución: 0,01 g.
- La muestra se agrega al líquido contenido en el frasco y se cierra con un tapón.
- El frasco se gira suavemente en un círculo horizontal hasta que no suban más burbujas de aire a la superficie del líquido.
- Seguidamente se toma la lectura final después que el frasco haya sido sumergido nuevamente en el baño termorregulador y alcance el equilibrio de temperatura.
- Se ejecuta el ensayo dos veces para cada muestra.
- Se expresa la densidad real de la muestra con la siguiente fórmula (Ver ec. 3.5):

$$C = \frac{W}{V_f - V_o} * 100 \qquad \text{ec. 3.5}$$

Donde:

C = Densidad real de la muestra (g/cm³).

W = Masa de la muestra ensayada (g).

V_f = Lectura final del volumen del líquido en el frasco (cm³).

V_o = Lectura inicial del volumen del líquido en el frasco (cm³).



Figura 3.8 Volumenómetro de Le Chatelier (Fuente propia)

Fase IV: Elaboración de mezclas de mortero patrón y modificado

Para la elaboración del diseño de mezclas de los morteros, se basará en la dosificación propuesta en la norma COVENIN 484-93: “Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8 mm de lado”, la cual define:

- Las proporciones de los materiales secos del mortero normalizado, deberán ser una parte de cemento a 2,75 partes de arena gradada normalizada en peso. (Ver Tabla 3.1).
- Se usará una relación agua/cemento de 0,485 para todas las muestras.
- Las adiciones de CCF gastado se realizarán como porcentaje en peso del cemento, con incrementos del 5%, hasta llegar al 30% de reemplazo.
- Las medición de los pesos de los materiales se realizan con una balanza digital (Modelo: Explorer Pro, Marca: Ohaus, Rango: 22000,00 g, Resolución: 0,1 g) (Ver Figura 3.9 (izq.)):

Tabla 3.1 Dosificación de materiales a mezclar para la preparación de probetas cúbicas

Mezclas	Materiales			
	Cemento (g)	Arena (g)	Agua (ml)	CCF (g)
M-I (Patrón)	1000	2750	485	0
M-II (5% CCF)	950	2750	485	50
M-III (10% CCF)	900	2750	485	100
M-IV (15% CCF)	850	2750	485	150
M-V (20% CCF)	800	2750	485	200
M-VI (25% CCF)	750	2750	485	250
M-VII (30% CCF)	700	2750	485	300

Para la preparación de la mezcla de mortero patrón y modificado con residuos CCF, se utiliza una mezcladora Hobart modelo N-50, que presenta una capacidad de 5 litros. Se mezcla por un período de tiempo de 5 minutos y medio, realizando el procedimiento que estipula la norma COVENIN 484-93 (Ver Figura 3.9 (der)):

- Se coloca toda el agua de mezclado en el recipiente.
- Se añade el cemento al agua. En el caso de los cementos con porcentaje de reemplazo de CCF, se añade dicho producto.
- Se hace funcionar la mezcladora a velocidad baja (140 ± 5 rpm) y se mezcla durante 30 s.
- Se añade la arena lentamente en un lapso de 30 s, mientras se continúa el mezclado a velocidad baja (140 ± 5 rpm).
- Se detiene la mezcladora, se cambia a velocidad rápida (285 ± 10 rpm) y se mezcla durante 30 s.
- Se detiene la mezcladora y durante 15 s se raspa rápidamente hacia abajo el mortero que se haya podido adherir a los lados del recipiente.
- Se tapa el recipiente con un paño húmedo y se deja reposar la mezcla durante un minuto y 15 s.

- Se hace funcionar la mezcladora a una velocidad rápida de 285 ± 10 rpm durante 60 s.
- Se detiene la mezcladora y se deja el mortero en reposo en el recipiente de mezclado sin tapar durante 90 s.

Para el moldeo de las probetas, inicialmente se colocará una capa de la mezcla con la ayuda de una cuchara en todos los compartimientos cúbicos, de 25mm de espesor aproximadamente, y se compacta 32 veces, realizando 4 vueltas, y cada vuelta deberá ser en ángulo recto con la anterior. Cuando se haya completado la compactación de la primera capa en todos los compartimientos cúbicos, se llenarán estos con mortero restante, se compacta de igual manera que la primera capa y se enrasa. El tiempo de moldeo no debe superar los 2 minutos y medio (Ver Figura 3.10 (izq.)).

Inmediatamente después de culminar el moldeo, se colocan las probetas de ensayo sobre una superficie libre de vibraciones. Al pasar 24 horas, se desmoldan se enumeran y se sumergen en tanques de almacenamiento, hasta la fecha de realización de los ensayos: 3, 7 y 28 días. (Ver Figura 3.10 (der))



Figura 3.9 Medición de la masa del material en la balanza digital (der.) Mezclado de los materiales del mortero (Fuente propia)



Figura 3.10 (izq.) Colocación del mortero en los moldes cúbicos (der.) Curado de las probetas cúbicas (Fuente propia)

Fase V: Ensayos de las mezclas de mortero

1. Mortero en estado fresco

1.1 Peso unitario: para el cálculo del peso unitario del mortero fresco se toma como referencia las especificaciones de la Norma Venezolana COVENIN 349-79 “Método de Ensayo Gravimétrico para Determinar el Peso por Metro Cúbico, Rendimiento y Contenido de Aire en el Concreto”. Primero se humedece el interior de un recipiente cilíndrico metálico y se coloca en una superficie plana, nivelada y firme. Luego se toma una muestra representativa del mortero recién elaborado con una cuchara metálica y se llena el recipiente con tres capas de igual espesor, sobrellenando ligeramente la última capa. Cada capa se compacta con 25 golpes de varilla, distribuyendo uniformemente las penetraciones en toda la sección del molde. Se compacta la capa inferior en todo su espesor, sin impactar en el fondo del recipiente con la barra compactadora. De igual forma se compacta la segunda y tercera capa penetrando una pulgada aproximadamente (25 mm) en la capa anterior. Para evitar que las burbujas de aire queden atrapadas en el interior de la muestra, se golpea firmemente los lados del molde de 10 a 15 veces con un mazo después de compactar cada capa y se enrasa el mortero sobrante utilizando la regla

metálica apoyada sobre el borde superior del recipiente, limpiando a su vez el exceso de mortero en dicho borde (Ver Figura 3.11 (izq.) y Figura 3.11 (der)). Se pesa el molde lleno de mortero en la balanza digital (Modelo: Explorer Pro, Marca: Ohaus, Rango: 22000,00 g, Resolución: 0,1 g) y se obtiene el peso unitario del mismo mediante la fórmula (Ver ec. 3.6):

$$PU = \frac{W_t - W_m}{V_m} \quad \text{ec. 3.6}$$

Donde:

P. U. = Peso Unitario del mortero (g/dm³).

W_t = Masa del molde más mortero (gramos).

W_m = Masa del molde (gramos).

V_m = Volumen del molde (dm³)



Figura 3.11 (izq.) Medición de la masa del molde (der.) Molde lleno de mortero (Fuente propia)

1.2 Tiempo de fraguado: se toma como referencia las especificaciones de la norma COVENIN 493-92: “Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat”.

- Las proporciones de los materiales de la pasta de cemento son las referidas en la norma COVENIN 493-92. (Ver Tabla 3.2).
- La cantidad de agua utilizada será la necesaria para obtener una mezcla de consistencia normal (Norma COVENIN 494-94: “Cemento Portland. Determinación de la consistencia normal).
- Las medición de los pesos de los materiales se realizan con una balanza digital (Modelo: Explorer Pro, Marca: Ohaus, Rango: 22000,00 g, Resolución: 0,1 g)
- Para cada mezcla se realizarán dos probetas para luego promediar los resultados obtenidos. En total se hicieron 14 probetas para desarrollar este ensayo.

Tabla 3.2 Dosificación de materiales a mezclar en el ensayo de Tiempo de fraguado

Mezclas	Materiales		
	Cemento (g)	Agua (ml)	CCF (g)
M-I (Patrón)	650,0	180	0
M-II (5% CCF)	617,5	180	32,5
M-III (10% CCF)	585,0	180	65
M-IV (15% CCF)	552,5	187	97,5
M-V (20% CCF)	520,0	195	130
M-VI (25% CCF)	487,5	200	162,5
M-VII (30% CCF)	455,0	215	195

***Nota:** Cambios en la cantidad de agua para cumplir con la consistencia normal de las pastas

Para la preparación de la mezcla de la pasta de cemento patrón y modificado con residuos FCC, se utilizó una mezcladora Hobart modelo N-50, que presenta una capacidad

de 5 litros. Se mezcla por un período de tiempo de dos minutos y quince segundos realizando el siguiente procedimiento:

- Se coloca toda el agua de mezclado en el recipiente.
- Se añade el cemento al agua. En el caso de los cementos con porcentaje de reemplazo de CCF, se añade el conjunto formado por el cemento y el catalizador.
- La mezcla se deja en reposo por 30 s.
- Seguidamente se inicia el proceso de mezclado a velocidad baja durante 30s.
- Se apaga la mezcladora y con una espátula se raspa las paredes de la tina que contiene la mezcla durante 15s.
- Se inicia nuevamente el proceso de mezclado a velocidad alta durante 60 s. (Ver Figura 3.12 (izq.))
- Con las manos previamente enguantadas, se recoge el material de la tina, se forma rápidamente una bola y se arroja seis veces de una mano a la otra manteniéndolas separadas alrededor de 15 cm.
- La bola que descansa en la palma de una mano se presiona dentro del extremo mayor del anillo tronco-cónico, el cual se sujeta con la otra mano, y se llena completamente.
- Se quita con la mano el exceso de pasta de cemento en el extremo mayor del anillo.
- Se coloca el anillo con su extremo mayor sobre la placa de vidrio.
- Se enrasa la pasta en exceso en el extremo menor con un pase de la cuchara de albañil. (Ver Figura 3.12 (der))
- Se coloca en el aparato de Vicat para revisar si presenta una consistencia normal (Penetración de 10 ± 1 mm con el extremo de la barra plano).

- Se enrasa nuevamente y se coloca la probeta de ensayo en el cuarto húmedo. Se deja reposar por un tiempo aproximado de una hora y se inician las mediciones con la Aguja de Vicat.
- Para el ensayo de penetración se baja la aguja hasta que descansa sobre la superficie de la pasta de cemento.
- Se aprieta el tornillo fijador y se coloca el indicador móvil en la marca cero de la escala.
- Se suelta la barra rápidamente aflojando el tornillo fijador y se deja que la aguja se asiente durante 30 s. (Ver Figura 3.13 (izq.))
- Se deben realizar mediciones de tal manera que se obtengan valores entre los siguientes intervalos: 30-40 mm, 20-30 mm, 10-20 mm y 0-10 mm.
- Al obtener la última medición, se saca la probeta del anillo y se voltea dejando arriba el extremo mayor. Se deja reposar en el cuarto húmedo por una hora aproximadamente y se vuelve a probar con la aguja hasta que no deje marca visible sobre la nueva superficie. El tiempo obtenido representa el tiempo de fraguado final. (Ver Figura 3.13 (der))
- Se anotan los resultados de todos los ensayos de penetración y por interpolación se determina el tiempo para obtener una penetración de 25 mm. Este es el tiempo de fraguado inicial (Ver ec. 3.7).

$$t_{inicial\ fraguado} = \frac{t_2 - t_1}{p_2 - p_1} * (25 - p_2) + t_2 \quad \text{ec. 3.7}$$

Donde:

$t_{inicial\ fraguado}$ = Tiempo inicial de fraguado (minutos).

t_1 = Tiempo de la primera medición (minutos).

t_2 = Tiempo de la segunda medición (minutos).

p_1 = Medición de penetración para el intervalo 30-40mm (mm).

p_2 = Medición de penetración para el intervalo 20-30mm (mm).

- Los resultados de la cantidad de agua requerida para obtener una consistencia normal se presentan como porcentaje del peso del material seco utilizado en la pasta (peso del cemento para la mezcla patrón y peso del conjunto formado por el cemento y el catalizador en las mezclas con reemplazo) (Ver ec. 3.8).

$$\% \text{ agua de amasado} = \frac{V_a}{W_m} * 100 \quad \text{ec. 3.8}$$

Donde:

% agua de amasado = Porcentaje de agua de la mezcla.

W_m = Peso del cemento o del conjunto cemento-CCF (gramos).

V_a = Volumen de agua utilizado en la mezcla (cm^3)



Figura 3.12 (izq.) División del material en tres partes durante el mezclado (der.) Molde troncocónico con mortero (Fuente propia)



Figura 3.13 (izq.) Medición de la penetración con la aguja de Vicat (der.) Probetas de ensayo dentro de la cámara de humedad (Fuente propia)

2. Mortero en estado endurecido

2.1 Resistencia a la compresión de probetas cúbicas: se toma como referencia las especificaciones de la norma COVENIN 484-93: “Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8mm de lado”. Se realizaron seis probetas cubicas de 50,8 mm de lado para cada edad de ensayo (3, 7 y 28 días) y para cada porcentaje de reemplazo de CCF. En total se hicieron 126 probetas (42 probetas para cada edad de ensayo). Para realizar el ensayo, los cubos se sacan de la piscina de curado para facilitar su posterior secado. Seguidamente se pesa cada uno de los cubos, se colocan cuidadosamente centrados en la máquina de ensayo (modelo: C41H4, rango: 0 a 200 KN y resolución: 0,01 KN) y se comprimen (Ver Figura 3.14 (izq.) y Figura 3.14 (der)). Posteriormente se obtienen los resultados de carga máxima aplicada indicados por la máquina de ensayos, los cuales se expresan en Kgf. La resistencia a la compresión de cada probeta se determina como el cociente entre la carga máxima y el área de la sección media del cubo, como se indica en la siguiente ecuación (Ver ec. 3.9 y ec. 3.10):

$$R'_{bi} = \frac{P_{imax}}{A_i} \quad \left(\frac{kgf}{cm^2} \right) \quad ec. 3.9$$

$$R'_{bi} = \frac{P_{imax}}{A_i * 10,197} \quad (Mpa) \quad ec. 3.10$$

Donde:

R'bi: resistencia a compresión de cada probeta (Kgf/cm² o Mpa).

Pimax: carga máxima aplicada (Kgf).

Ai: área de la sección transversal del cubo (cm²)



Figura 3.14 (izq.) Prensa para ensayos de compresión (der.) Falla de las probetas durante el ensayo de compresión (Fuente propia)

2.2 Índice de actividad puzolánica: se toma como referencia las especificaciones de la norma COVENIN 3135-94: “Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica”. A partir de los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión, se calcula el índice de actividad puzolánica con la siguiente expresión (Ver ec. 3.11):

$$\text{Índice} = \frac{A}{B} * 100 \qquad \text{ec. 3.11}$$

Donde:

A: Resistencia a la compresión promedio de los cubos de la muestra de ensayo, en Kg/cm² (con puzolana).

B: Resistencia a la compresión promedio de los cubos de la muestra de control, en Kg/cm².

El índice de actividad puzolánica calculado debe dar 75%, mínimo según la norma COVENIN 3135-94, a los 7 o 28 días.

Fase VI: Análisis y presentación de resultados

Los resultados serán expuestos en el Capítulo “Resultados” del presente Trabajo Especial de Grado, siguiendo con el orden establecido en el presente capítulo. Los mismos serán expresados con figuras, gráficas y tablas características para cada método.

En primer lugar, a las muestras de catalizador gastado CCF y cemento Portland I-R se le practicó un estudio fisicoquímico. Los resultados obtenidos serán presentados de la siguiente manera:

- Tabla comparativa de la composición química por ICP-EA de las muestras estudiadas, en la que se expresa los porcentajes de los principales compuestos químicos que las conforman (Ver Tabla 4.1).
- Difractogramas de Rayos X de las muestras estudiadas, identificando los picos que se presentan en dichas gráficas (Ver Gráfico 4.1 y Gráfico 4.2).
- Cuadro resumen de la composición mineralógica de las muestras estudiadas (Ver tabla 4.2).
- Tabla comparativa de los principales parámetros granulométricos de las muestras estudiadas (Ver Tabla 4.3).
- Gráficos de las granulometrías de las muestras estudiadas (Ver Gráfico 4.3 y Gráfico 4.4).
- Micrografías de las muestras de CCF gastado y cemento Portland I-R (Ver Figura 4.1 y Figura 4.2).
- Espectros de las muestras estudiadas por EDS (Ver Gráfico 4.5, Gráfico 4.6, Tabla 4.4 y Tabla 4.5).
- Tabla comparativa de los resultados obtenidos de los ensayos de densidad, superficie específica y finura por Tamiz #325 de las muestras estudiadas (Ver Tabla 4.6).

Seguidamente, se estimó el comportamiento mecánico de las mezclas modificadas y patrón a través de los ensayos de tiempo de fraguado y de resistencia a compresión de las probetas cúbicas. Los resultados obtenidos serán presentados de la siguiente manera:

- Cuadro resumen del porcentaje de agua de amasado, tiempo de fraguado inicial y tiempo de fraguado final para cada una de las mezclas de mortero realizada (Ver Tabla 4.7).

- Gráficos donde se observe la relación entre el agua de amasado (Ver Gráfico 4.7), el tiempo de fraguado inicial (Ver Gráfico 4.8) y el tiempo de fraguado final (Ver Gráfico 4.9) con el porcentaje de CCF utilizado en la mezcla.
- Cuadro resumen del peso unitario propio de cada una de las mezclas de mortero realizada (Ver Tabla 4.8).
- Gráfico de la tendencia que presenta el peso unitario con relación al porcentaje de CCF utilizado en la mezcla (Ver Gráfico 4.10).
- Cuadro resumen de la resistencia a compresión media y la correspondiente desviación típica de los ensayos a probetas cúbicas para las edades de 3, 7 y 28 días (Ver Tabla 4.9).
- Gráficos de la evolución de la resistencia media con relación al porcentaje de CCF utilizado en la mezcla para cada edad de ensayo (Ver Gráfico 4.11; Gráfico 4.12 y Gráfico 4.13).
- Gráfico de la tendencia que presenta la resistencia media con relación a la edad de ensayo para cada mezcla de mortero (Ver Gráfico 4.14).
- Fotografías de los tipos de fallas obtenidos en el ensayo a compresión de probetas cúbicas (Ver Figura 4.3 y Figura 4.4)

Por último, se determinó la actividad puzolánica en morteros con sustitución de CCF, y se comparó con el valor mínimo que exige la norma COVENIN 3135:94 (75%). Los resultados obtenidos serán presentados de la siguiente manera:

- Cuadro resumen del índice de actividad puzolánico para cada mezcla de mortero en las edades de ensayo 3, 7 y 28 días (Ver Tabla 4.10).
- Gráfico en el que se representa la evolución del índice de actividad puzolánico de las mezclas de mortero en función de la edad de ensayo y se compara con el valor mínimo que exige la norma para ser considerada la adición como material puzolánico (Ver Gráfico 4.15).

En el desarrollo de los cálculos de resistencia media y desviación estándar, se usaron parámetros estadísticos a fin de obtener un valor promedio de resistencia a compresión y un índice de dispersión o variabilidad de los resultados; así como una forma de verificar el grado de control y confiabilidad de los ensayos realizados.

Estos parámetros son los referenciados en la Norma COVENIN 3549:99 “Tecnología del concreto. Manual de elementos de estadística y diseño de experimentos”:

- Media aritmética de la serie de probetas (Ver ec. 3.12):

$$R'_{bs} = \frac{\sum_{i=1}^n R'_{bi}}{n} \quad (Mpa) \quad \text{ec. 3.12}$$

Donde:

R'bs: Resistencia a compresión media por serie o mezcla (Mpa).

R'bi: Resistencia a compresión de cada probeta (Mpa).

n: Número de probetas por serie o mezcla.

- Recorrido de la serie de probetas (Ver ec. 3.13):

$$R_i = R'_{b1} - R'_{b3} \quad (Mpa) \quad \text{ec. 3.13}$$

Donde:

Ri: Intervalo o recorrido de los valores de resistencia para una serie (Mpa).

R'b1: Valor mayor de resistencia a compresión de una serie de probetas (Mpa).

R' b3: Valor menor de resistencia a compresión de una serie de probetas (Mpa).

- Media aritmética del lote de mezclas (Ver ec. 3.14):

$$R'_{bm} = \frac{\sum_{i=1}^n R'_{bs}}{m} \quad (Mpa) \quad \text{ec. 3.14}$$

Donde:

R'bm: Resistencia a compresión media del lote de mezclas de un mismo porcentaje de CCF (Mpa).

R'bs: Resistencia a compresión media por serie o mezcla (Mpa).

m: Número de mezclas o series de probetas de un mismo porcentaje de CCF.

- Recorrido medio del lote de mezclas(Ver ec. 3.15):

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{m} \quad (Mpa) \quad \text{ec. 3.15}$$

Donde:

\bar{R} : Intervalo o recorrido medio del lote de mezclas de un mismo porcentaje de CCF (Mpa).

Ri: Intervalo o recorrido de los valores de resistencia para una serie (Mpa).

m: Número de mezclas o series de probetas de un mismo porcentaje de CCF.

- Desviación típica interna del ensayo (Ver ec. 3.16):

$$S_1 = \frac{1}{d^2} * \bar{R} \quad (Mpa) \quad \text{ec. 3.16}$$

Donde:

S1: Desviación típica interna del ensayo (Mpa).

\bar{R} : Intervalo o recorrido medio del lote de mezclas de un mismo porcentaje de CCF (Mpa).

1/d²: Constante que depende del número de probetas promediadas de la serie.

(Ver Tabla 3.3)

Tabla 3.3 Valores de d² y de 1/d² en función del número de probetas de la serie (COVENIN 3549:99).

Número de probetas de la serie	— d ₂	1/d ₂
2	1,128	0,8865
3	1,693	0,5907
4	2,059	0,4857
5	2,326	0,4299
6	2,534	0,3946
7	2,704	0,3698
8	2,847	0,3512
9	2,970	0,3367
10	3,078	0,3249

- Coeficiente de variación interno del ensayo (Ver ec. 3.17):

$$V_1 = \frac{S_1}{R'_{bm}} * 100 \quad (\%) \quad \text{ec. 3.17}$$

Donde:

V1: Coeficiente de variación interno del ensayo (%). Compararlo con los valores de la Tabla 3.4

S1: Desviación típica interna del ensayo (Mpa).

R'bm: Resistencia a compresión media del lote de mezclas de un mismo porcentaje de CCF (Mpa).

Tabla 3.4 Valores de V1 para diferentes grados de control (COVENIN 3549:99).

Tipo de operación	Grados de control				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Deficiente
Control de campo (a pie de obra o planta)	< 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	5,0 – 6,0	> 6,0
Mezclas de prueba en el laboratorio	< 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0	4,0 – 5,0	> 5,0

- Desviación típica del lote de mezclas (Ver ec. 3.18):

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (R'_{bs} - R'_{bm})^2}{m - 1}} \quad (Mpa) \quad \text{ec. 3.18}$$

Donde:

SL: Desviación típica del lote de mezcla (Mpa). Compararlo con los valores de la Tabla 3.5

R'bm: Resistencia a compresión media del lote de mezclas de un mismo porcentaje de CCF (Mpa).

R'bs: Resistencia a compresión media por serie o mezcla (Mpa).

m: Número de mezclas o series de probetas de un mismo porcentaje de CCF.

Tabla 3.5 Valores de SL para diferentes grados de control (COVENIN 3549:99).

Tipo de operación	Grados de control				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Deficiente
Control de campo (a pie de obra o de planta)	< 2,81	2,81 – 3,52	3,52 – 4,22	4,22 – 4,92	> 4,92
Mezclas de prueba en el laboratorio	< 1,41	1,41 – 1,76	1,76 – 2,11	2,11 – 2,46	> 2,46

- Verificación de valores individuales de resistencia a la compresión de las probetas (Ver ec. 3.19):

$$\frac{|R'_{bi} - R'_{bs}|}{S_L} < 3 \quad \text{ec. 3.19}$$

Donde:

SL: Desviación típica del lote de mezcla (Mpa).

R'bs: Resistencia a compresión media por serie o mezcla (Mpa).

R'bi: Resistencia a compresión de cada probeta (Mpa).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico a las muestras de catalizador gastado CCF y cemento Portland I-R se presentan a continuación:

Tabla 4.1 Composición química por ICP-EA de las muestras estudiadas

Muestra	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%K ₂ O + %Na ₂ O	%TiO ₂	%P.F.
Cemento I-R	6,09	23,28	3,76	61,01	2,12	1,56	0,55	1,63
CCF	26,67	53,29	1,08	10,03	3,24	1,84	0,46	3,29

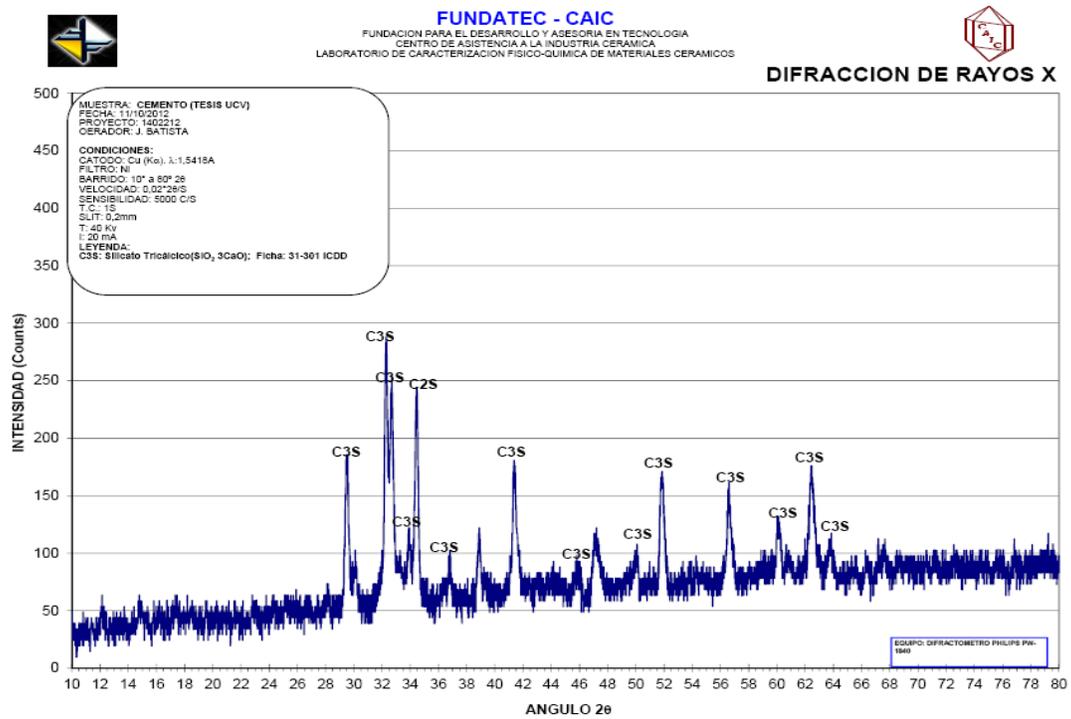


Gráfico 4.1 Difractograma del cemento Portland I-R (Ver Apéndice D)

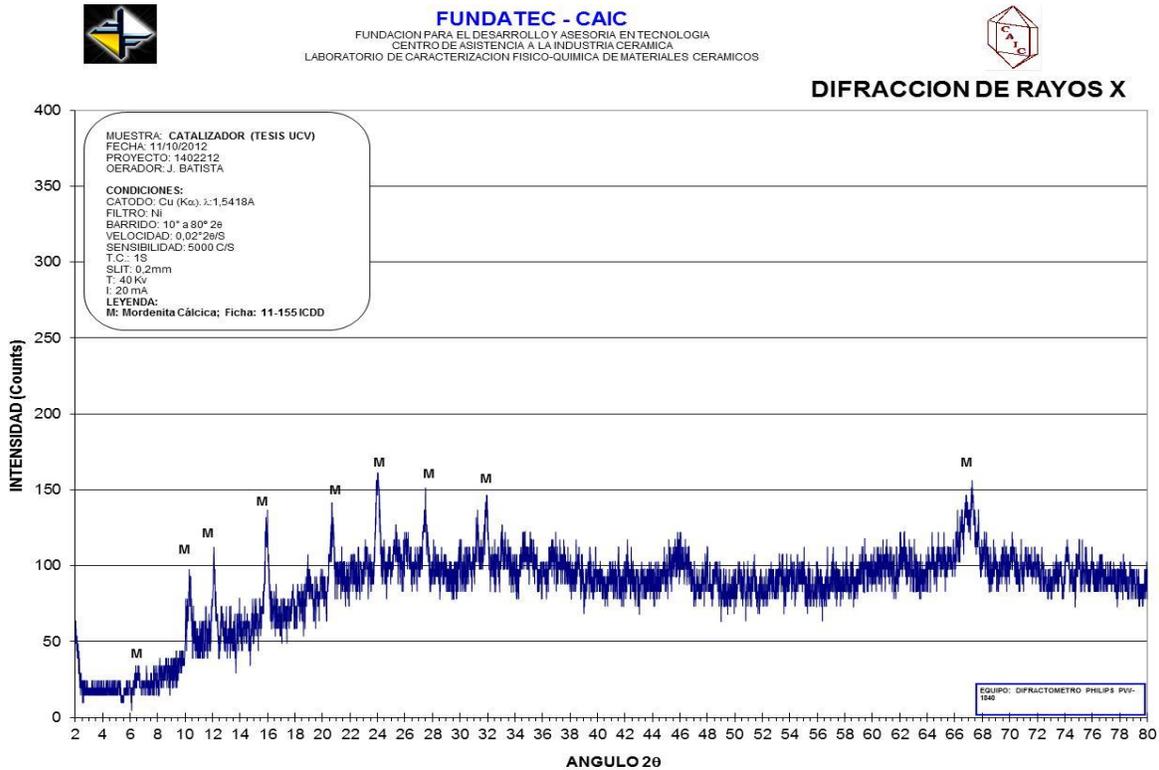


Gráfico 4.2 Difractograma del catalizador gastado CCF (Ver Apéndice D)

Tabla 4.2 Mineralogía por difracción de Rayos X

Muestra	C3S (Silicato Tricálcico) (SiO ₂ 3CaO) ficha: 31-301 ICDD	Mordenita cálcica (CaAl ₂ O ₃ 10SiO ₂ 7H ₂ O) Ficha: 11-155 ICDD
Cemento I-R	+++++	----
Catalizador CCF		++

Donde: +++++ fuerte presencia
 +++ presencia moderada
 ++ leve presencia
 ---- ausencia de fase

Tabla 4.3 Principales parámetros granulométricos de las muestras estudiadas

Muestra	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Modal (μm)	S.E. (m ² /g)
Cemento I-R	5,014	18,481	60,063	23,373	0,215
CCF	48,181	82,272	137,943	83,278	0,030

Donde: **D₁₀** Diámetro que se encuentra inferior al 10% de la distribución general
D₅₀ Diámetro promedio (50% de la distribución nominal)
D₉₀ Diámetro que se encuentra superior al 90% de la distribución general
Modal Diámetro de mayor población en la muestra
S.E. Superficie específica por medición láser

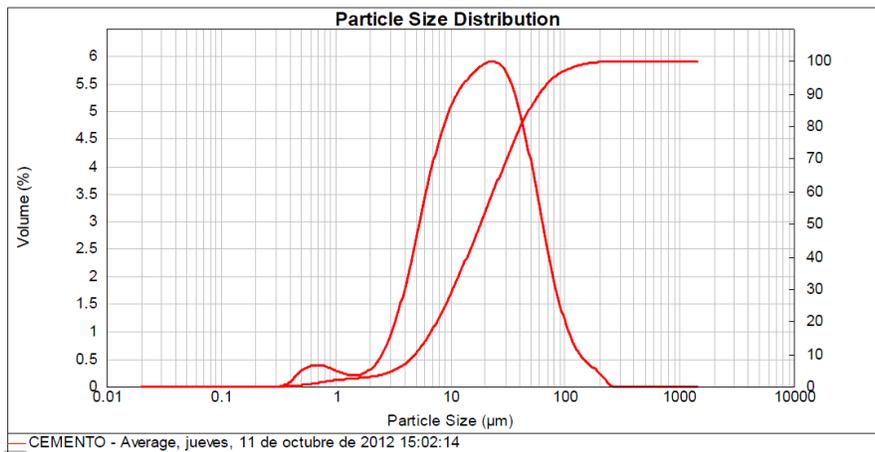


Gráfico 4.3 Granulometría del cemento Portland I-R (Ver Apéndice E)

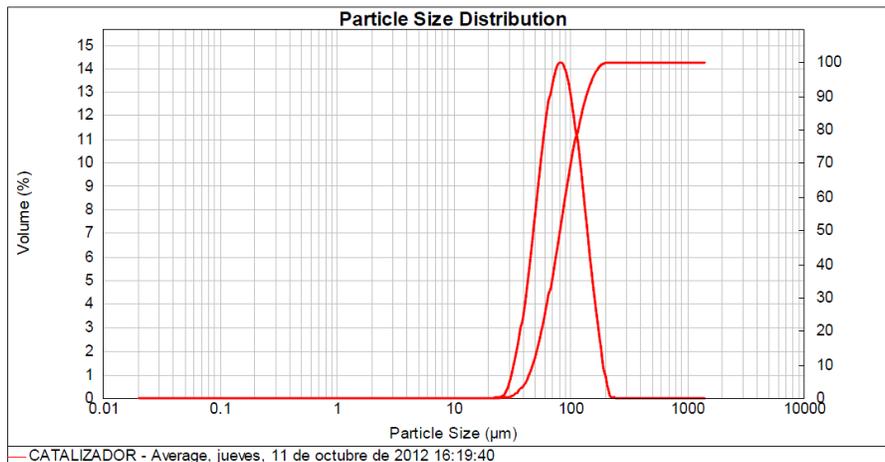


Gráfico 4.4 Granulometría del catalizador gastado CCF (Ver Apéndice E)

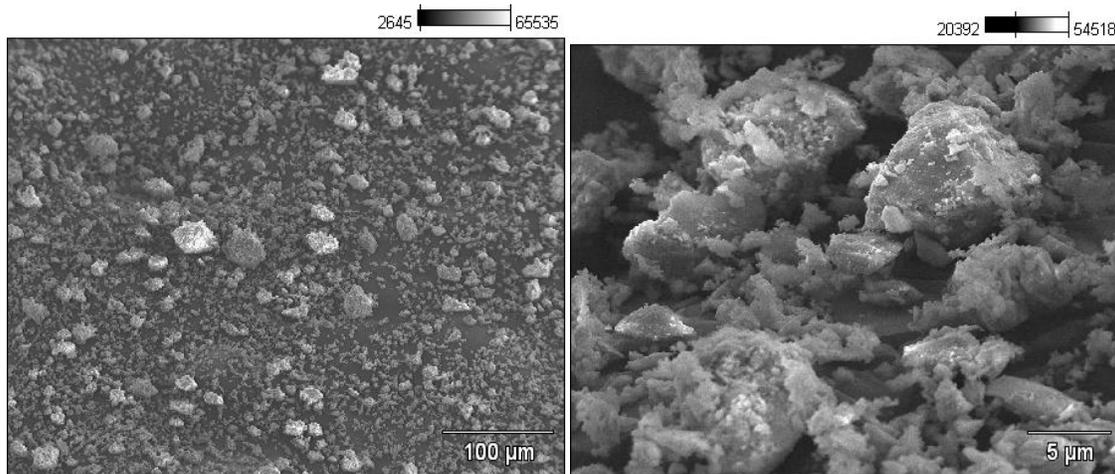


Figura 4.1 Micrografía de la muestra del cemento: (izq.) con magnificación de 100X (der.) con magnificación de 1500X

Full scale counts: 4219 Muestra 2(1)_pt1

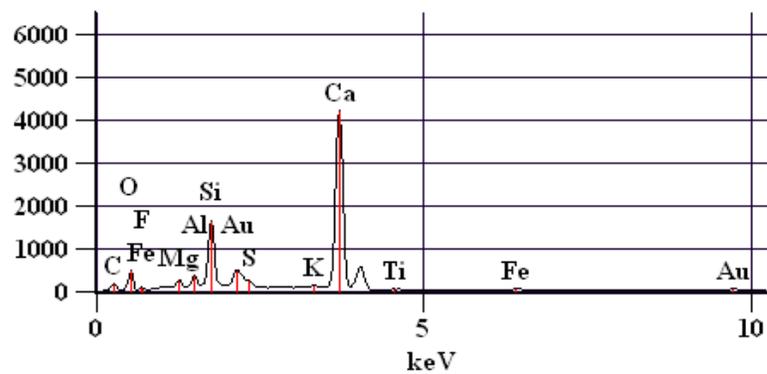


Gráfico 4.5 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS de la muestra de cemento

Tabla 4.4 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS del cemento (Ver Apéndice F).

Muestra	% Peso										
	O-K	F-K	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Ti-L	Fe-L
2(1)_Pto 1	5,41	0,44	---	2,11	2,72	15,16	2,20	1,16	61,51	7,51	1,77
2(1)_Pto 2	3,00	0,05	---	1,17	1,47	18,55	---	---	74,65	---	1,12
2(1)_Pto 3	7,34	---	0,87	1,81	6,90	16,73	---	1,74	60,72	---	3,90

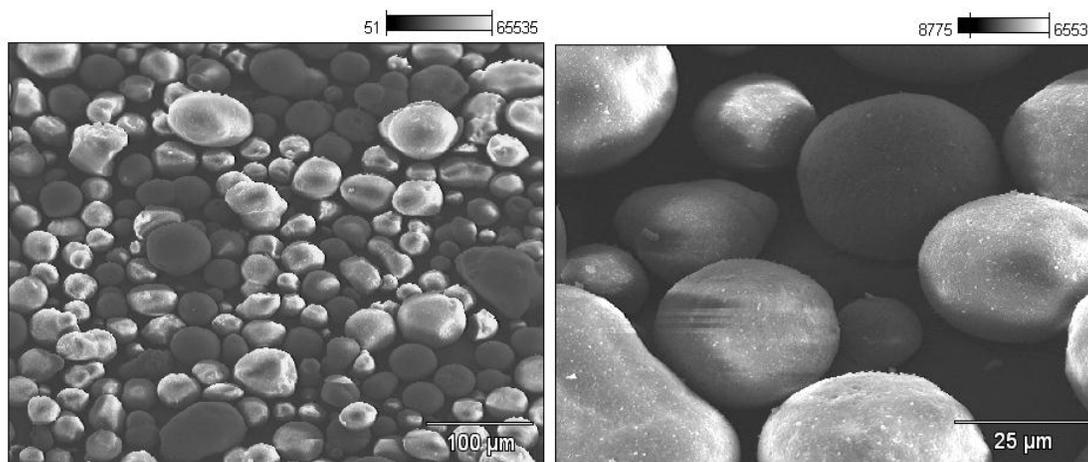


Figura 4.2 Micrografía de la muestra del CCF: (izq.) con magnificación de 100X (der.) con magnificación de 500X

Full scale counts: 10757 Muestra 1(5)_pt2

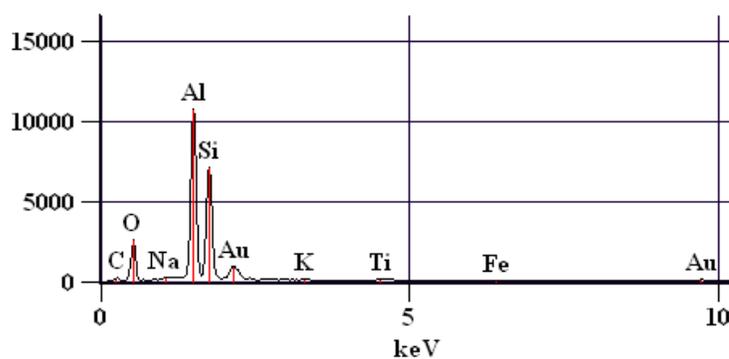


Gráfico 4.6 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS de la muestra de CCF

Tabla 4.5 Análisis químico semi-cuantitativo por EDS del CCF (Ver Apéndice F).

Muestra	% Peso								
	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K	Ti-L	Fe-K	Ni-L	La-L
2(1)_Pto 1	13,92	0,98	54,07	24,32	---	---	0,34	0,69	5,69
2(1)_Pto 2	13,41	0,81	45,35	30,53	0,23	9,61	0,06	---	---
2(1)_Pto 3	15,13	0,81	43,34	29,58	---	---	0,04	---	11,10
2(1)_Pto 4	15,40	---	47,09	27,74	---	---	0,11	---	9,66

Tabla 4.6 Características físicas de los materiales cementantes (Ver Apéndice G y H)

Material	Cemento	CCF
Densidad (g/cm ³)	3,09 ± 0,01	2,58 ± 0,01
Superficie por ADL(m ² /g)	0,215	0,030
Superficie por Blaine(m ² /Kg)	388	----
% Ret Tamiz #325	11,7	86,4
% Fin Tamiz #325	88,3	13,6

Los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos a las mezclas modificadas y patrón se presentan a continuación:

Tabla 4.7 Porcentaje de agua de amasado, tiempo de fraguado inicial y tiempo de fraguado final para cada una de las mezclas con distinto porcentaje de reemplazo de CCF (Ver Apéndice I)

Mezclas	Ensayo	Porcentaje agua amas (%)	Promedio (%)	T fraguado inicial (min)	Promedio (min)	T fraguado final (min)	Promedio (min)
M- I (Patron)	1	27,7	27,7	135	134	217	218
	2	27,7		134		220	
M- II (5% CCF)	1	27,7	27,7	136	136	224	222
	2	27,7		136		221	
M- III (10% CCF)	1	27,7	27,7	135	133	232	231
	2	27,7		132		231	
M- IV (15% CCF)	1	28,8	28,8	133	132	230	229
	2	28,8		131		228	
M- V (20% CCF)	1	30,0	30,0	139	146	231	230
	2	30,0		153		229	
M- VI (25% CCF)	1	30,8	30,8	148	148	236	236
	2	30,8		148		237	
M- VII (30% CCF)	1	33,1	33,1	159	157	244	243
	2	33,1		156		243	

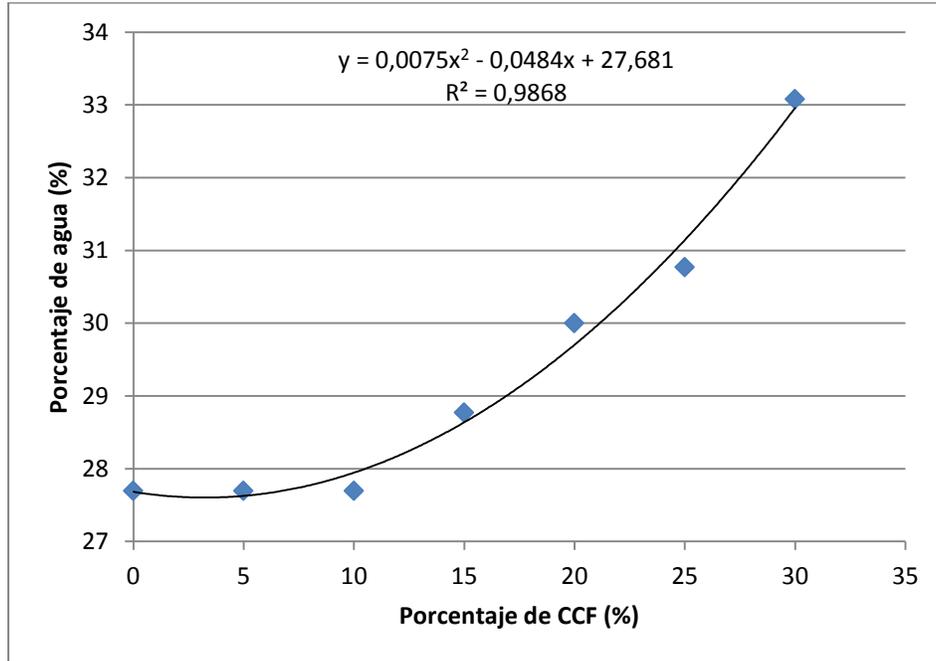


Gráfico 4.7 Porcentaje de agua de amasado en función del porcentaje de CCF

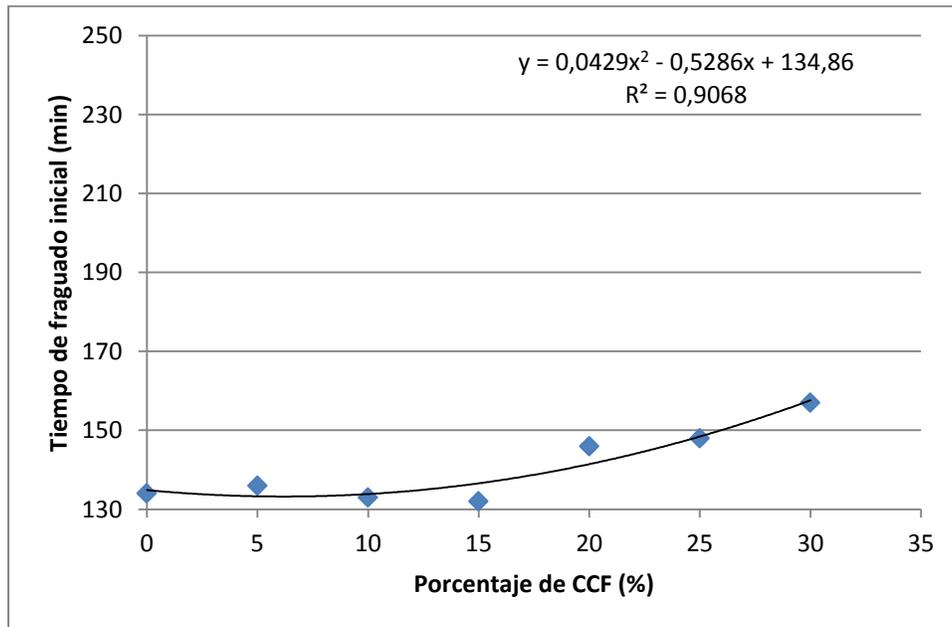


Gráfico 4.8 Tiempo de fraguado inicial en función del porcentaje de CCF

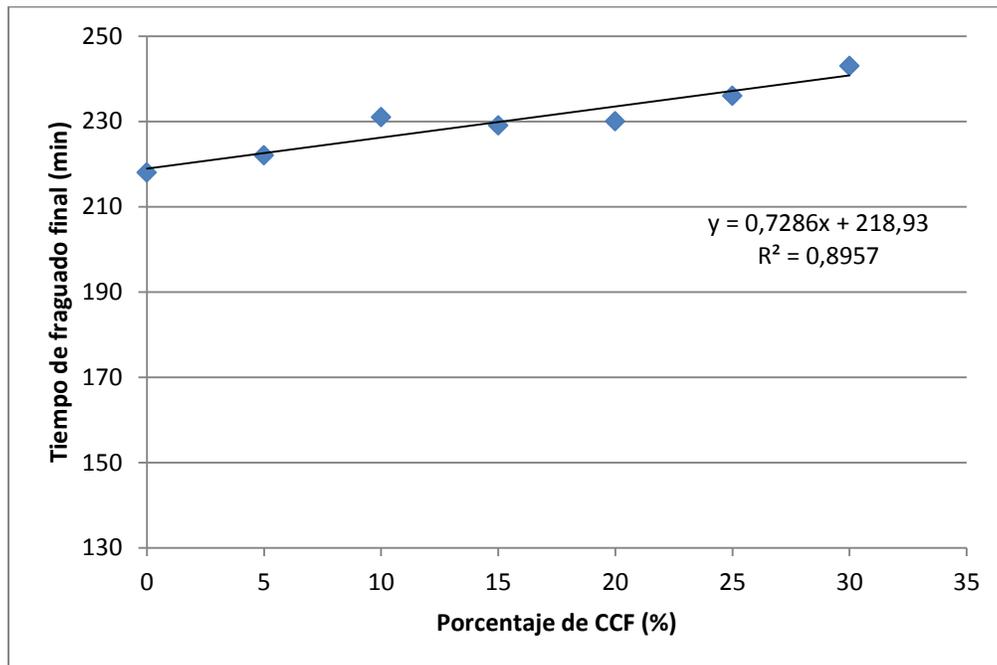


Gráfico 4.9 Tiempo de fraguado final en función del porcentaje de CCF

Tabla 4.8 Peso unitario del mortero para cada una de las mezclas con distinto porcentaje de reemplazo de CCF

Mezclas	Peso Mezcla + Recip (g)	Peso Recip (g)	Volumen Recip (dm ³)	Peso Unitario (Kg/m ³)
M- I (Patron)	1323,5	824,6	0,222	2247,3
M- II (5% CCF)	1309,7			2185,1
M- III (10% CCF)	1308,4			2179,3
M- IV (15% CCF)	1306,2			2169,4
M- V (20% CCF)	1272,7			2018,5
M- VI (25% CCF)	1268,9			2001,4
M- VII (30% CCF)	1260,2			1962,2

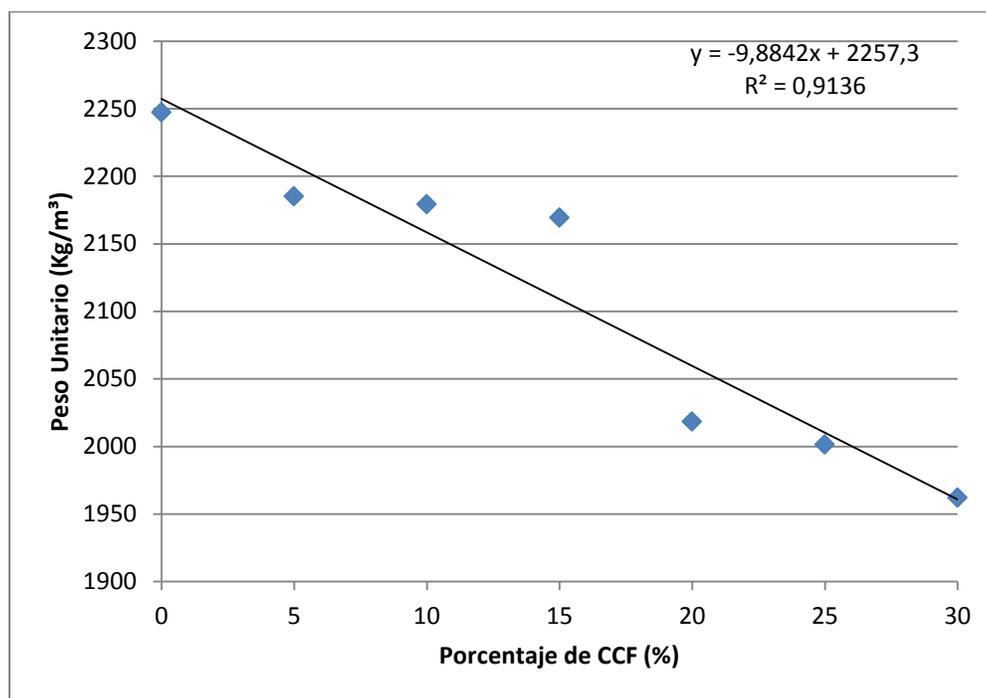


Gráfico 4.10 Peso unitario en función del porcentaje de CCF

Tabla 4.9 Resistencia a compresión media y desviación típica obtenida de los ensayos a las edades de 3, 7 y 28 días (Ver Apéndice J)

Mezclas	Rc 3 días Mpa (Kgf/cm²)		Rc 7 días Mpa (Kgf/cm²)		Rc 28 días Mpa (Kgf/cm²)	
	R'bm	SL	R'bm	SL	R'bm	SL
M- I (Patron)	29,6 (301,9)	0,3 (3,4)	40,2 (410,3)	0,9 (9,1)	47,1 (479,9)	0,3 (3,5)
M- II (5% CCF)	27,4 (279,9)	1,5 (14,8)	39,9 (406,7)	2,0 (20,4)	49,2 (501,6)	1,5 (15,3)
M- III (10% CCF)	22,8 (232,7)	0,7 (6,8)	34,6 (352,5)	2,0 (20,5)	36,9 (376,4)	0,5 (5,2)
M- IV (15% CCF)	20,0 (203,7)	1,1 (11,2)	29,0 (295,6)	1,8 (18,4)	39,2 (399,4)	2,0 (20,6)
M- V (20% CCF)	17,7 (180,1)	1,5 (15,2)	26,7 (272,4)	1,9 (19,7)	32,0 (326,7)	0,5 (4,9)
M- VI (25% CCF)	17,2 (175,5)	1,3 (13,7)	23,9 (244,0)	0,4 (4,4)	30,9 (314,7)	0,4 (4,1)
M- VII (30% CCF)	13,6 (139,0)	0,4 (3,8)	19,8 (202,3)	0,8 (7,9)	26,6 (271,5)	0,6 (6,6)

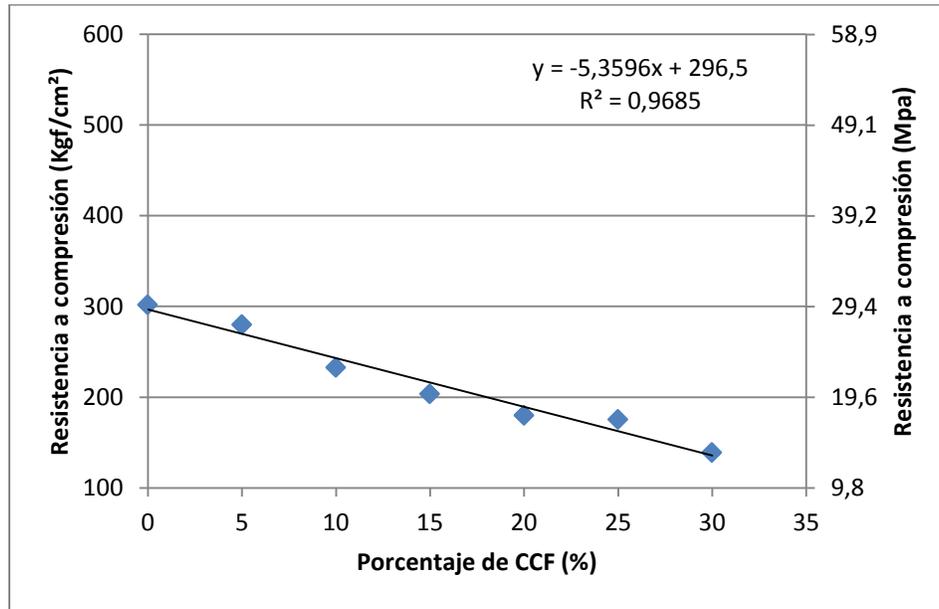


Gráfico 4.11 Resistencia a compresión a los 3 días en función del porcentaje de CCF

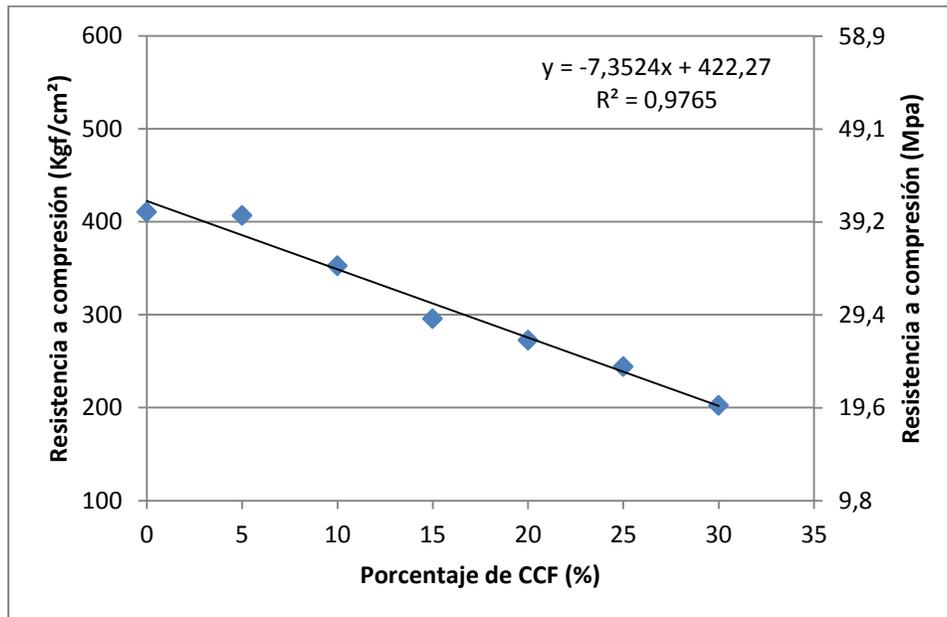


Gráfico 4.12 Resistencia a compresión a los 7 días en función del porcentaje de CCF

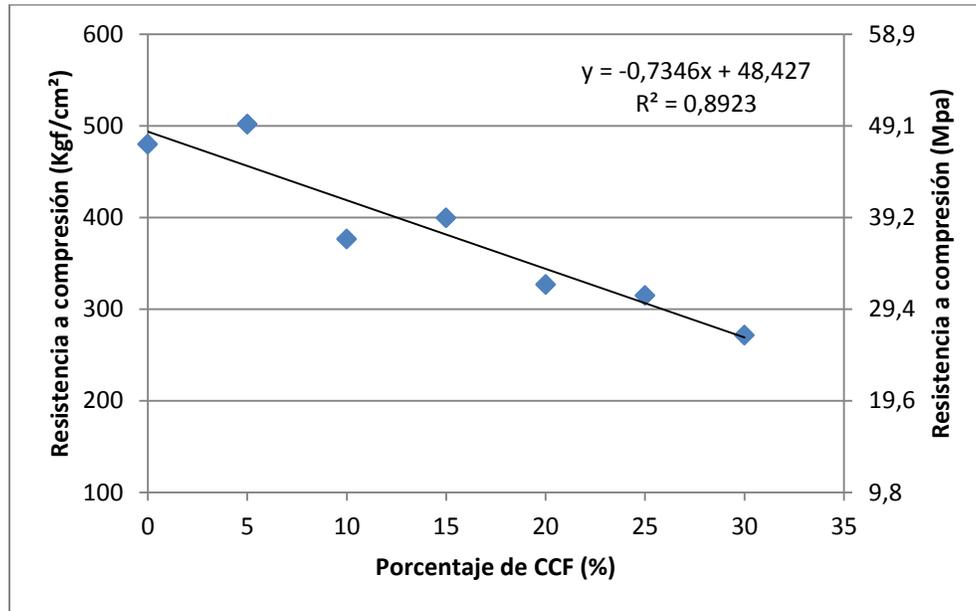


Gráfico 4.13 Resistencia a compresión a los 28 días en función del porcentaje de CCF

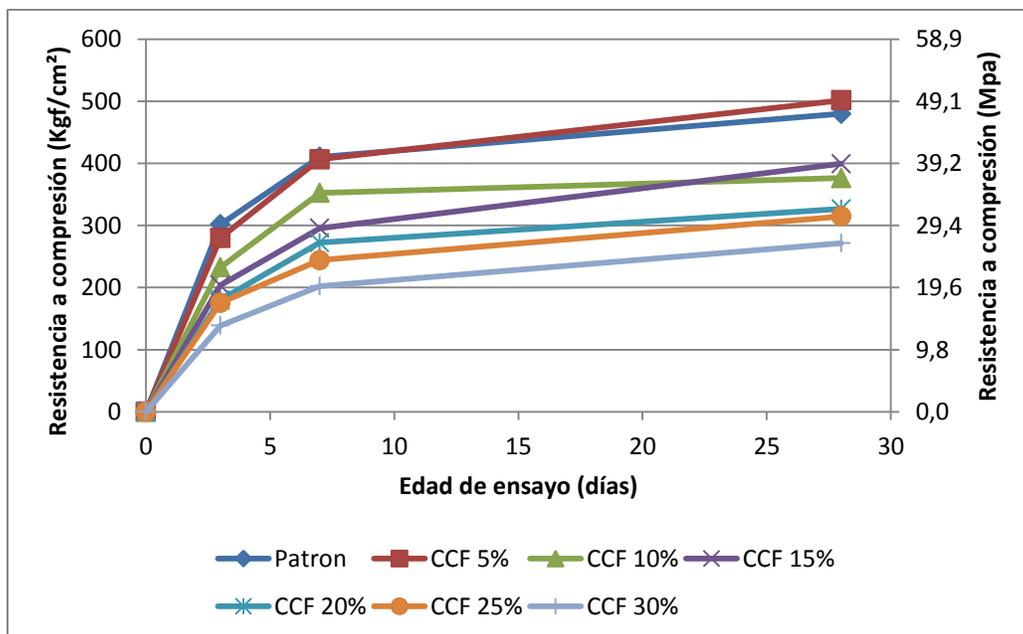


Gráfico 4.14 Contraste de tendencia de la resistencia a compresión media en función de la edad de ensayo en cada una de las mezclas

Al determinar la actividad puzolánica en los morteros con porcentaje de CCF gastado, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 4.10 Índice de actividad puzolánico obtenido para cada una de las mezclas en las edades de ensayo 3, 7 y 28 días

Mezclas	Edad de Ensayo (días)		
	3	7	28
M- II (5% CCF)	92,71	99,11	104,53
M- III (10% CCF)	77,09	85,92	78,43
M- IV (15% CCF)	67,47	72,04	83,23
M- V (20% CCF)	59,65	66,39	68,09
M- VI (25% CCF)	58,12	59,48	65,57
M- VII (30% CCF)	46,03	49,31	56,57

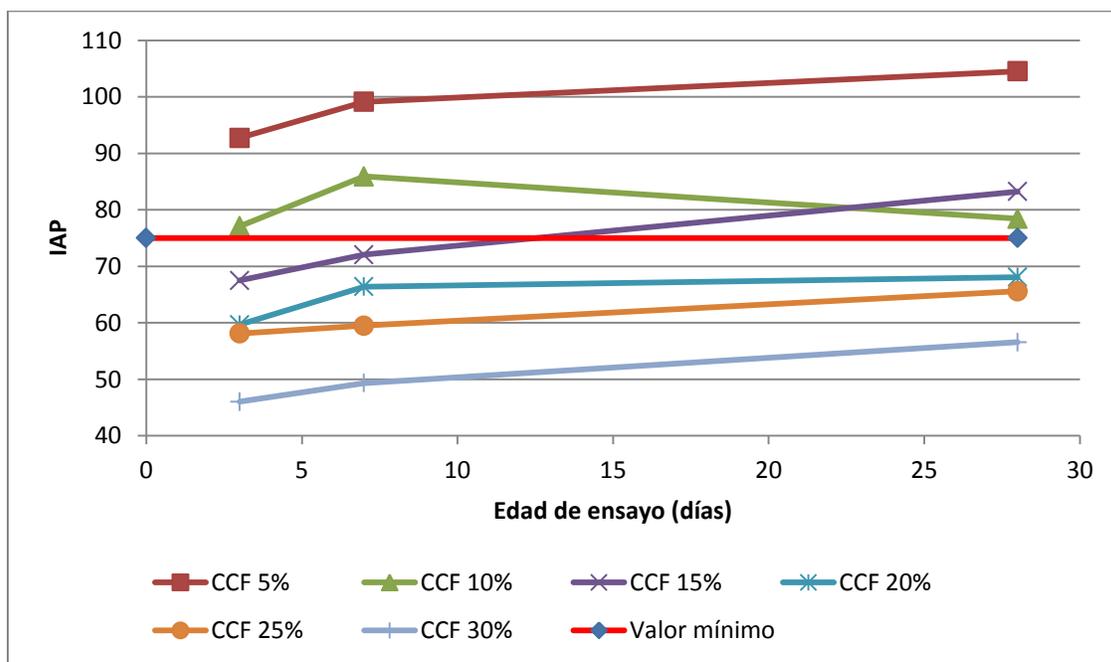


Gráfico 4.15 Evolución del índice de actividad puzolánica en función de la edad de ensayo en cada una de las mezclas

Tipos de fallas



Figura 4.3 Falla a compresión. Rotura tipo doble pirámide (1) (Fuente propia)



Figura 4.4 Falla a compresión. Rotura tipo doble pirámide (2) (Fuente propia)

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Composición química de las muestras

Las composiciones químicas de las muestras de cemento y de residuo CCF estudiadas fueron determinadas a través de la espectroscopía por emisión atómica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-EA) (Ver Tabla 4.1).

Como se puede observar, ambas muestras presentan una composición química dentro de los parámetros típicos de estos tipos de materiales. En el caso del cemento Portland I-R, el CaO es el compuesto que se presenta en mayor proporción (61,01%); la relación SiO_2/CaO es de 1:3, lo que indica la presencia del Silicato Tricálcico, fase principal de los cementos silico-cálcicos. El porcentaje de MgO (2,12%) y la pérdida al fuego (P.F.) (1,63%) están por debajo del valor máximo establecido por la norma COVENIN 28:2003 para cemento Portland Tipo I (6,00% y 5,5% respectivamente). Así mismo, el valor promedio (1,2%) presentado de P.F. en el certificado de calidad del cemento utilizado (Ver Apéndice A) es similar al obtenido en el ensayo, lo cual proporciona validez al resultado obtenido.

En relación al catalizador gastado CCF, este presenta una composición del tipo sílico-aluminoso, ya que la suma de estos óxidos ácidos se encuentra cerca del 80%, característico de las zeolitas. El contenido de SiO_2 es de 53,29% mientras que el de Al_2O_3 es de 26,67%, los cuales están dentro del rango esperado por la empresa fabricante (Fábrica Carioca de catalizadores S.A.), tomando en cuenta la información presentada en la hoja de seguridad del producto (Ver Apéndice B). La pérdida al fuego fue de 3,29% en peso, lo que es indicativo de que este residuo contiene partículas o depósitos de carbón que suelen aparecer en los procesos catalíticos de craqueo.

También se realizó un análisis químico semi-cuantitativo por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) para identificar los elementos químicos que se presentan en las muestras (Ver Apéndice F) y verificar los resultados obtenidos por la técnica ICP-EA.

En cuanto a la muestra de cemento, se mantiene la relación SiO_2/CaO en 1:3 y las proporciones de aluminatos y óxido férrico son bajas (Ver Gráfico 4.5 y Tabla 4.4). Por su parte, la muestra de catalizador gastado CCF conserva una composición principalmente de alúmina y silicatos. Se observó la presencia de elementos de la familia de los lantánidos, que son óxidos metálicos típicos que se usan para formular las zeolitas existentes en estos catalizadores. Estos compuestos no fueron identificados en el otro análisis (Ver Gráfico 4.6 y Tabla 4.5). Así mismo, no se pudo determinar la presencia de calcio en el catalizador, sin embargo esta técnica al realizar un análisis puntual sólo capta los elementos químicos presentes en las zonas próximas, por tanto, sus resultados no engloban todo el universo de la muestra como el primer método, dejando la incertidumbre de la presencia de calcio en otras zonas. Lo único que si se puede corroborar es la poca proporción de este elemento en la muestra.

El análisis EDS presentó trazas de oro (Au) en ambas muestras, lo cual se debe al recubrimiento de oro-paladio que fueron sometidas las mismas inicialmente para hacerlas conductoras eléctricas.

5.2 Comparación de los difractogramas de rayos X de las muestras

El análisis por Difracción de Rayos (DRX) determinó que la fase cristalina predominante en la muestra de cemento es el Silicato Tricálcico ($\text{SiO}_2\text{3CaO}$), presentando picos bien definidos, lo que indica una buena cristalización de la fase (Ver Gráfico 4.1). Esto corrobora lo anterior expuesto en el análisis de la composición química.

El difractograma de la muestra de catalizador gastado CCF presentó picos correspondientes a una zeolita del tipo Modernita cálcica ($\text{CaAl}_2\text{O}_3\cdot 10\text{SiO}_2 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$). La desviación en la línea base observada en la zona $2\theta = 15\text{-}30^\circ$ (Ver Gráfico 4.2), así como la formación de picos pocos definidos es característico de materiales amorfos, lo cual es lógico si se toma en cuenta que es un material usado que durante el proceso de ruptura catalítica experimenta tratamientos rigurosos en el regenerador que modifica su comportamiento y estructura mineral, que se pone de manifiesto en la consecuente pérdida de su actividad para el proceso de craqueo. Seguidamente, se presenta la Tabla 4.2 donde se expresa, a manera de resumen, las fases cristalinas predominantes de las muestras del cemento y el residuo de catalizador CCF.

5.3 Análisis del tamaño de partículas en las muestras

El analizador de partículas Mastersizer 2000 proporciona resultados del análisis físico de una muestra mediante el empleo de tecnología de difracción de luz (láser). En los reportes emitidos por el equipo (Ver Apéndice E) se observa una gráfica de distribución de tamaño de partículas en relación al volumen de la muestra estudiada. En dichos gráficos, son apreciables dos características importantes: la primera es el rango, el cual proporciona el intervalo de tamaño de partículas dentro del cual estuvo la muestra estudiada; en la medida en la que el rango sea más pequeño la distribución en el tamaño de las partículas es mejor. La segunda es la presencia de picos; lo cual es indicativo de la uniformidad en el tamaño de las partículas de la muestra. Así al presentarse un pico pronunciado en la gráfica indica una mayor uniformidad que si se presentan 2 o más picos.

El rango de tamaño de partículas para el cemento estuvo entre $0,32\ \mu\text{m}$ y $160\ \mu\text{m}$, mientras que para la muestra de catalizador gastado CCF se apreció un rango entre $25\ \mu\text{m}$ y $160\ \mu\text{m}$. Esto demuestra que el catalizador presenta pocas partículas finas en relación al cemento utilizado.

Lo mismo se puede observar al pasar las muestras por el tamiz #325 (45 μ m). Del ensayo se obtuvo para el cemento un porcentaje de finos de 88,3% y un porcentaje retenido de 11,7%; mientras que para el catalizador gastado CCF se obtuvo 13,6% y 86,4% respectivamente. Esto demuestra la gran diferencia en cuanto al tamaño de partículas que presentan ambos materiales (Ver Tabla 4.6).

A partir de la gráfica de distribución de partículas para el cemento (Ver Gráfico 4.3), se puede concluir que el mismo presenta una granulometría media, con una distribución bimodal (dos picos), con un modal de 23,373 μ m y diámetro promedio de 18,481 μ m (Ver Tabla 4.3), lo cual es muy elevada para los cementos de este tipo, en donde debería ubicarse entre los 8 y 10 μ m. No obstante, al ser el primer pico poco pronunciado, el material sigue manteniendo cierta uniformidad.

En cuanto al catalizador gastado CCF (Ver Gráfico 4.4), este presenta una granulometría unimodal muy uniforme y gruesa, típico en estos materiales, con un modal de 83,278 μ m y un diámetro promedio de 82,272 μ m (Ver Tabla 4.3).

En relación al diámetro promedio de partículas vinculado al volumen de muestra estudiado, se especifican los valores promedios para los porcentajes acumulados de partícula de 10, 50 y 90%, de lo cual se deduce lo siguiente:

El rango estadístico de tamaños de partícula para la muestra de cemento gira en torno a 5,014 μ m y 60,063 μ m, con un diámetro promedio de 18,481 μ m; mientras que para la muestra de residuo de catalizador CCF tiene un intervalo entre 48,181 μ m y 137,943 μ m, con un diámetro promedio de 82,272 μ m (Ver Tabla 4.3). Estos valores evidencian las grandes discrepancias que presentan ambos materiales en cuanto al tamaño de partícula, lo que origina poca uniformidad en la granulometría si se mezclan dichos materiales en estado natural.

El área superficial específica de un material representa un parámetro que influye directamente en la capacidad de interacción química. Cuando las partículas son más

pequeñas presentan mayor área y son mucho más reactivas; caso contrario si las partículas son relativamente grandes.

En el caso de la muestra de cemento, la superficie específica fue muy baja ($0,215 \text{ m}^2/\text{g}$) tomando en consideración que el rango típico de este tipo de material está entre $0,5$ a $0,7 \text{ m}^2/\text{g}$. Para la muestra de residuo de CCF se obtuvo $0,03 \text{ m}^2/\text{g}$, valor muy bajo que corresponde con la granulometría del mismo (Ver Tabla 4.3). Comparando los resultados se concluye que están muy alejados entre sí y la capacidad de reacción de ambos materiales se ve disminuida por su baja superficie específica.

Por otro lado, se determinó la superficie específica por medio del aparato Blaine de permeabilidad, obteniéndose para el cemento un valor de $388 \text{ m}^2/\text{Kg}$ (Ver Tabla 4.6), el cual está por encima del valor promedio mínimo estipulado por la norma COVENIN 28:2003 ($280 \text{ m}^2/\text{Kg}$) y está muy cercano al valor promedio ($386 \text{ m}^2/\text{Kg}$) especificado en el certificado de calidad del cemento utilizado (Ver Apéndice A), proporcionando validez a los resultados obtenidos en este ensayo. Para la muestra del catalizador gastado CCF, no se pudo determinar la superficie específica por este método ya que se tenía que moler la muestra, lo cual cambiaría las condiciones naturales del material, introduciendo una variable que no es objeto de esta investigación. Es importante recalcar que ambos métodos ofrecen valores que no son comparables ya que utilizan principios que no se correlacionan.

El diámetro medio del volumen proyectado ($D[4,3]$) y el diámetro medio de superficie proyectada ($D[3,2]$) son parámetros predictivos vinculados directamente a la ubicación del centro de gravedad de las partículas.

Para el análisis de la muestra de cemento, el diámetro medio del volumen proyectado fue de $27,438 \text{ }\mu\text{m}$ y el diámetro medio de superficie proyectada fue $8,891 \text{ }\mu\text{m}$; mientras que para la muestra de CCF gastado estos parámetros tomaron valores de $88,379 \text{ }\mu\text{m}$ y $75,553 \text{ }\mu\text{m}$ respectivamente. Los diámetros del residuo del catalizador son muy superiores a los que presenta el cemento, lo que indica que al entrar en contacto los granos

de ambos materiales con agua se producirán reacciones de hidratación que serán más rápidas en el cemento que en el CCF gastado. Esto se debe a que el agua engloba los granos más pequeños rápidamente. En el caso del residuo del catalizador será gradual su interacción química y una mayor parte de las partículas no se hidratará, disminuyendo su aporte al desarrollo de la resistencia.

5.4 Morfología de las partículas que conforman las muestras

La microscopía electrónica fue la técnica escogida para conocer la forma, el aspecto y la textura de las partículas del residuo de catalizador CCF y el cemento en su estado original. En la Figura 4.1 se muestran micrografías del cemento Portland utilizado y en la Figura 4.2 se hace lo propio para el catalizador gastado.

Como se puede observar en las micrografías, el cemento utilizado presenta partículas de forma irregular, de tamaño medio aproximado de 20 μm . Sobre los granos se observan conglomerados de partículas finas de silicatos. También se puede visualizar ciertas partes de la muestra con brillo, esto es debido a la concentración de oxígeno en forma de óxido.

Por su parte el residuo de catalizador en estado original presenta partículas de forma esférica, de tamaño aproximado de 80 μm . Los granos son bastante lisos, poco porosos, lo cual no es común en este tipo de material. Las partículas más grandes se encuentran formadas principalmente de alúmina y adheridos a ellos se encuentran conglomerados de partículas finas de silicatos (Ver Apéndice F).

5.5 Densidad promedio de las muestras

La densidad real de las muestras se realizó a través de un volumenómetro de Le Chatelier. Esta propiedad física define la relación entre la masa de un material y el respectivo volumen que ocupa.

El valor obtenido de densidad del cemento utilizado fue de $3,09 \text{ g/cm}^3$, el cual corresponde a los estándares para este tipo de material ($3,05$ y $3,15 \text{ g/cm}^3$). En cuanto al desecho del catalizador CCF, se obtuvo un valor de $2,58 \text{ g/cm}^3$, el cual es un poco elevada ya que para este tipo de material sin usar el rango típico está entre $2,10$ y $2,20 \text{ g/cm}^3$ (Ver Tabla 4.6). Esto es debido a que dicho catalizador al ser un material gastado, debe poseer carga por síntesis (adición de partículas durante el craqueo), lo que aumenta su masa original.

Comparando ambos valores, los mismos presentan una diferencia de aproximadamente $0,5 \text{ g/cm}^3$, siendo el cemento el material más denso. Este parámetro tiene especial importancia para determinar las dosificaciones de una mezcla de mortero o concreto.

La desviación típica obtenida de las dos determinaciones de la densidad real a través del frasco volumétrico de Le Chatelier hechas para la muestra de cemento y del catalizador gastado fue de $0,01 \text{ g/cm}^3$ para ambas, lo cual cumple con las especificaciones de la norma COVENIN 492:1994, proporcionando confiabilidad al ensayo realizado.

5.6 Ensayo de medición del tiempo de fraguado con la Aguja de Vicat

Las mediciones del tiempo de fraguado de la mezcla patrón y las mezclas con residuo de catalizador se hicieron a través de la Aguja de Vicat. Para cada porcentaje de CCF gastado se hicieron dos determinaciones, y el promedio de ambas fue el resultado tomado.

Se presenta una tabla resumen (Ver Tabla 4.7) de los valores obtenidos en cada ensayo, así como los promedios calculados por mezcla. Es importante resaltar que para validar el ensayo se debía verificar inicialmente que la pasta presentara la consistencia normal que establece la norma COVENIN 494:1994.

En cuanto al porcentaje de agua de amasado en relación al porcentaje de adición del catalizador gastado, se genera una tendencia proporcional ascendente que se visualiza en el Gráfico 4.7, en el que para porcentajes bajos como 5 y 10% no se presenta variación pero a partir de 15% si es necesario el aumento del agua de amasado en la pasta, es decir, a medida que aumenta el porcentaje de residuo CCF en la mezcla se necesita mayor cantidad de agua para que la pasta presente la consistencia normal. En este sentido, se percibió una disminución de la fluidez de las mezclas con la adición de CCF gastado. 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. Los valores de la relación agua/material cementante varían entre 27,7% (mezcla patrón) hasta 33,1% (mezcla con 30% de residuo CCF).

En cuanto al tiempo de fraguado inicial en relación al porcentaje de adición del catalizador gastado, se puede visualizar en el Gráfico 4.8 que para porcentajes bajos como 5, 10 y 15%, en los que se mantuvo un porcentaje de agua de amasado constante, se presentan valores cercanos, con un ligero declive, lo que indica que el catalizador favorece las reacciones de hidratación y adelanta el fraguado. Este comportamiento también se observó durante el desarrollo de las probetas para el ensayo de resistencia, en el que se mantenía constante la relación agua/material cementante. Haciendo un análisis químico, esta reducción se justifica por una mayor cantidad de aluminatos en las pastas que incorporan los residuos de CCF.

A partir de 15% si se observa una marcada tendencia de aumento del tiempo de fraguado inicial. Esto puede deberse en parte al aumento de agua para cumplir con la consistencia normal. Esta variabilidad hace determinar la influencia del residuo del catalizador CCF sobre el tiempo de fraguado con cierta incertidumbre. Para ser más concluyentes, se debería incorporar un aditivo plastificante que permita mantener una misma dosificación de agua en las pastas con adiciones de CCF gastado.

El rango de valores obtenidos del tiempo de fraguado inicial varía entre 134 min (mezcla patrón) hasta 157 min (mezcla con 30% de residuo CCF). Comparando la medición obtenida para la mezcla patrón y el valor promedio (102 min) que se presenta en el certificado de calidad del cemento utilizado se presenta una diferencia considerable. Por otro lado, contrastando los valores obtenidos de todas las mezclas con el valor mínimo (45 min) establecido en la norma COVENIN 28:2003, se encuentran todos los valores por encima del mismo, cumpliendo con la norma.

En cuanto al tiempo de fraguado final en relación al porcentaje de adición del catalizador gastado, se puede visualizar en el Gráfico 4.9 una tendencia proporcional ascendente. A medida que aumenta el porcentaje del residuo CCF en la mezcla el atiesamiento de la pasta se ve retardado. Esto se debe en parte al aumento de agua para cumplir con la consistencia normal, lo que genera cierta incertidumbre al momento de definir la influencia del catalizador gastado CCF sobre el tiempo de fraguado final.

El rango de valores obtenidos del tiempo de fraguado final varía entre 218 min (mezcla patrón) hasta 243 min (mezcla con 30% de CCF gastado). Comparando la medición obtenida para la mezcla patrón y el valor promedio (231 min) que se presenta en el certificado de calidad del cemento utilizado se puede decir que ambos valores se aproximan, obteniendo un valor relativamente cercano. Por otro lado, contrastando los valores obtenidos de todas las mezclas con el valor máximo (480 min) establecido en la norma COVENIN 28:2003, se encuentran todos los valores por debajo del mismo, cumpliendo con la norma.

5.7 Peso unitario compactado de las mezclas de mortero en estado fresco

El peso unitario de las mezclas de morteros desarrolladas se llevó a cabo utilizando un recipiente hecho en el laboratorio soldando un tubo de 2" y una plancha metálica. Antes de realizar el ensayo, se corroboró que la soldadura haya quedado hermética y se midió el volumen del molde llenándolo con agua y luego vertiendo dicho contenido en un cilindro graduado.

El valor de peso unitario compactado para cada una de las mezclas con porcentaje de reemplazo de CCF gastado se vio disminuido respecto al peso unitario compactado de la mezcla patrón ((Ver Tabla 4.8). Se presenta una tendencia inversa entre el peso unitario y el porcentaje de CCF gastado que sustituye al cemento, lo cual se puede visualizar en la Gráfica 4.10. Los valores obtenidos están entre 2247,3 Kg/m³ (mezcla patrón) y 1962,2 Kg/m³ (mezcla con 30% de CCF gastado).

Estos resultados son coherentes tomando en cuenta que el residuo del catalizador en esta investigación es menos denso que el cemento, lo cual al aumentar la proporción del material menos denso y simultáneamente disminuir el material más denso se obtiene un peso unitario menor de la mezcla (Ver Tabla 4.6).

5.8 Ensayos de resistencia a compresión

La medición de la resistencia a compresión de las mezclas de mortero se realizó a través de probetas cúbicas, siguiendo la norma COVENIN 484:1993. Se realizaron dos series de probetas para cada porcentaje de CCF gastado y se ensayaron a las edades de 3, 7 y 28 días. Se utilizó arena de Ottawa, agua potable y dos sacos de cemento Portland I-R de la misma fecha y lugar de elaboración para disminuir las variabilidades intrínsecas propias de los materiales. Se presenta una tabla resumen (Ver Tabla 4.9) con los valores promedio por lote de mezcla así como su respectiva desviación típica, tanto en unidades de Mpa como de Kg/cm².

La resistencia promedio obtenida en la mezcla patrón a los 3 días fue de 29,6 Mpa (301,9 Kgf/cm²), resultado por encima del valor promedio (23,1 Mpa) que presenta el certificado de calidad del cemento (Ver Apéndice A), lo que indica una buena calidad del material utilizado. A partir del Gráfico 4.11 se puede observar como los morteros con residuo de catalizador no logran superar la resistencia a compresión obtenida por el mortero patrón. También se puede observar una relación inversa entre el porcentaje de CCF gastado y la resistencia obtenida por dicha mezcla. Los valores obtenidos en esta edad de curado varían entre 29,6 Mpa (Mezcla patrón) y 13,6 Mpa (Mezcla con 30% del residuo de CCF). Comparando todos los valores obtenidos en el ensayo con el valor promedio del certificado de calidad del cemento, sólo la mezcla patrón y la que presenta un porcentaje de 5% de residuo CCF superan este valor. Por otro lado, contrastando los resultados obtenidos en el ensayo con el valor promedio mínimo (10,0 Mpa) establecido en la norma COVENIN 28:2003, todas las mezclas cumplen.

La resistencia promedio obtenida en la mezcla patrón a los 7 días fue de 40,2 Mpa (410,3 Kgf/cm²), resultado por encima del valor promedio (31,0 Mpa) que presenta el certificado de calidad del cemento (Ver Apéndice A), lo que indica una buena calidad del material utilizado. A partir del Gráfico 4.12 se puede observar como los morteros con residuo de catalizador no logran superar la resistencia a compresión obtenida por el mortero patrón, sin embargo la mezcla con 5% del residuo de CCF presenta valores muy cercanos. También se puede observar una relación inversa entre el porcentaje de CCF gastado y la resistencia obtenida por dicha mezcla. Los valores obtenidos en esta edad de curado varían entre 40,2 Mpa (Mezcla patrón) y 19,8 Mpa (Mezcla con 30% de CCF gastado). Comparando todos los resultados obtenidos en el ensayo con el valor promedio del certificado de calidad del cemento, la mezcla patrón y los morteros con porcentajes de 5 y 10% del residuo de CCF superan este valor. Por otro lado, contrastando los valores obtenidos en el ensayo con el valor promedio mínimo (17,0 Mpa) establecido en la norma COVENIN 28:2003, todas las mezclas cumplen.

La resistencia promedio obtenida en la mezcla patrón a los 28 días fue de 47,1 Mpa (479,9 Kgf/cm²), resultado por encima del valor promedio (38,7 Mpa) que presenta el certificado de calidad del cemento (Ver Apéndice A), lo que indica una buena calidad del material utilizado. A partir del Gráfico 4.13 se puede observar que la mezcla con 5% del residuo de CCF logra superar la resistencia a compresión obtenida por el mortero patrón, mientras que las demás mezclas siguen por debajo de este valor. En esta edad de curado se sigue manteniendo una relación inversa entre el porcentaje de CCF gastado y la resistencia obtenida por dicha mezcla. Los valores obtenidos en esta edad de curado varían entre 49,2 Mpa (Mezcla con 5% de CCF gastado) y 26,6 Mpa (Mezcla con 30% de CCF gastado). Comparando todos los resultados obtenidos en el ensayo con el valor promedio del certificado de calidad del cemento, la mezcla patrón y los morteros que presentan un porcentaje de 5, 10 y 15% del residuo de CCF superan este valor. Por otro lado, contrastando los valores obtenidos en el ensayo con el valor promedio mínimo (27,4 Mpa) establecido en la norma COVENIN 28:2003, sólo la mezcla con 30% de residuo CCF no cumple. El porcentaje de CCF gastado de 5% será el más conveniente para ser utilizado como sustituto del cemento y obtener la máxima resistencia a compresión sin producir variaciones importantes al fraguado.

En el Gráfico 4.14 se representa la tendencia de la resistencia a compresión media en función de la edad de ensayo para cada mezcla. Se puede observar que todas las mezclas aumentan su resistencia a medida que la edad de ensayo es mayor, lo cual es lo esperado. Comparando la curva de la mezcla patrón y la de 5% de CCF gastado, se muestra como a edades tempranas (3 y 7 días) el mortero con residuo no supera la resistencia obtenida por el mortero patrón, aunque los datos son muy cercanos. Es a partir de los 14 días de curado cuando el mortero con residuo de catalizador comienza a superar ligeramente la resistencia del mortero control, y se produce un aumento progresivo de los valores de resistencia, hasta llegar a los 28 días de curado. Este comportamiento tiene estrecha relación con la finura del material cementante, el cual mientras más finamente molido se encuentre su velocidad de hidratación será mayor, por lo tanto, su desarrollo de resistencia es más rápido.

En el Gráfico 4.15, se representan los valores del índice de actividad puzolánica (IAP). Este índice se define como el cociente entre la resistencia del mortero con puzolana y el mortero control. El IAP fue calculado para cada una de las mezclas y para cada edad de ensayo, obteniendo valores mayores al 75% (valor estipulado en la norma COVENIN 3135:94 para definir si un material presenta un comportamiento puzolánico) en las mezclas con porcentaje de residuo CCF del 5, 10 y 15% (Ver Tabla 4.10). Estos datos confirman que los residuos de catalizador de craqueo catalítico utilizados en la Refinería de Amuay tienen un comportamiento puzolánico importante.

El índice de actividad puzolánica se vio disminuido en la medida en que se incrementó el porcentaje de cemento al sustituir por catalizador gastado CCF. Sólo se presentó un cambio de tendencia entre los porcentajes de 10 y 15% de residuo CCF a los 28 días. Se necesitará realizar más ensayos a compresión de probetas cúbicas con estos porcentajes para verificar este salto y determinar las causales que lo originaron.

Haciendo un análisis químico, la disminución del IAP al incrementar la adición de CCF gastado es debido a la demanda creciente de hidróxido de calcio ($CA(OH)_2$), producido de la hidratación del cemento, por parte de la puzolana para poder reaccionar con el agua y producir el gel CSH. Al incrementar el porcentaje de sustitución del cemento por residuo CCF, llega un momento que la producción de $CA(OH)_2$ no es suficiente para la cantidad de puzolana presente en la mezcla y por tanto, parte de este material actuará de forma inerte y no aportará beneficios resistentes al mortero.

Los valores obtenidos estuvieron en el siguiente rango: a 3 días de curado entre 92 y 46%, a 7 días de curado entre 99 y 49% y para 28 días de curado entre 104 y 56%. Es de hacer notar, que el índice se fue incrementando a medida que aumentaba la edad de ensayo, menos en la mezcla con 10% de porcentaje de CCF gastado.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se puede observar la rotura de las probetas cúbicas al ser ensayadas a compresión en la prensa. Para todas las probetas ensayadas, se obtuvo un agrietamiento similar en las cuatro caras libres, generalmente con pequeño daño en caras de

carga. Las probetas toman una forma de doble pirámide al finalizar el ensayo, característico de un correcto desarrollo del experimento.

Finalmente, se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos por el ensayo de compresión a probetas cúbicas con la finalidad de determinar la variabilidad de los resultados y verificar el grado de control puesto en práctica en los ensayos, proporcionando confiabilidad a los resultados obtenidos (Ver Apéndice J). Se tomó en cuenta lo estipulado en la norma COVENIN 3549:1999 para realizar las verificaciones por valores individuales, por series de probetas y por lote de probetas. Se obtuvo un control Bueno, Muy Bueno o Excelente en todos los ensayos y las desviaciones estuvieron entre 0,3 y 2,0 Mpa, valores bajos que corroboran un buen desarrollo de los experimentos y una buena homogeneización de los materiales que se utilizaron.

CONCLUSIONES

El catalizador gastado de craqueo catalítico, al ser un material de desecho de la industria petrolera, no tiene valor comercial. Si a esto se le suma, la posición geográfica de las refinерías y las cementeras del país, se puede deducir que los costos de transporte de esta materia prima serían bajos por las cercanías de ambas industrias. Y más relevante aún, Venezuela al ser un país petrolero con las reservas de crudo pesado más grandes del mundo, utilizará paulatinamente más unidades catalíticas para una refinación óptima, lo cual se traduce en una mayor producción de residuos de catalizador que se les debe buscar un uso para evitar hacinarlos en vertederos controlados que contaminen al ambiente. Simultáneamente, se está incrementando la demanda de cemento en el país por los múltiples desarrollos habitacionales y de infraestructura en general, aumentando la extracción en canteras y, el uso de energía y emisiones de dióxido de carbono durante la producción del clinker. El autor opina que si se unen ambas industrias para llevar a la práctica la propuesta de adicionar el desecho de catalizador CCF al cemento, grandes beneficios se obtendrán.

El análisis químico de las muestras de CCF gastado y del cemento Portland fue realizado siguiendo las normativas venezolanas y cumpliendo con las mismas. La composición química del residuo de catalizador CCF permitió constatar la matriz sílico-aluminosa propia de este tipo de material (zeolita del tipo modernita cálcica amorfa), la cual en proporciones adecuadas y al entrar en contacto con el agua, favorece la hidratación del cemento y se produce la reacción puzolánica, fijando la cal y propiciando la formación del gel CSH, lo que se traduce en incremento de la resistencia a compresión del material. Sin embargo, el porcentaje de pérdida al fuego que presentó la muestra es indicativo de que se debe llevar un control de las partículas o depósitos de carbón antes de utilizar el lote de catalizador. Por su parte, la muestra de cemento presentó una fase cristalina predominante

de silicato Tricálcico, lo cual es lo esperado tomando en cuenta su composición principal de silicatos y óxidos de calcio.

El análisis físico de las muestras estudiadas se realizó empleando la tecnología del analizador de partículas Mastersizer 2000 y el microscopio electrónico Hitachi S-2400. Ambas técnicas son válidas, de uso extendido en este campo y presentan valores de las características físicas de las partículas de forma rápida y automatizada. Los resultados permitieron comparar la muestra del catalizador gastado CCF con la del cemento Portland I-R, concluyendo que en estado natural las partículas de ambas muestras presentan grandes diferencias en cuanto a su tamaño. 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. Para evitar estas discrepancias, se debería moler el residuo del catalizador hasta lograr valores semejantes en los parámetros granulométricos obtenidos por la muestra de cemento, con el objeto de homogeneizar el tamaño de partícula al momento de mezclar ambos materiales, y así aumentar su superficie específica y acelerar su velocidad de reacción con el agua.

En cuanto a la forma de las partículas de las muestras de cemento y catalizador gastado CCF, la primera presentó una forma irregular mientras que la otra se caracterizó por una morfología esférica, poco porosa.

Al determinar la densidad real de las muestras de cemento y de catalizador usado CCF, el primer material resultó más denso que el segundo.

Se pudo verificar por medio de los ensayos mecánicos de laboratorio realizados en esta investigación a pastas y morteros que el catalizador gastado 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.

Se demostró que los residuos de catalizador de craqueo catalítico utilizados en la refinería de Amuay tienen un comportamiento puzolánico importante, ya que los resultados del IAP obtenidos en las mezclas con porcentaje de residuo CCF del 5, 10 y 15% fueron superiores al valor mínimo de 75% establecido en la norma COVENIN 3135:94. Esta actividad puzolánica se vio disminuida en la medida en que se incrementó el porcentaje de CCF gastado como reemplazo del cemento.

El porcentaje de sustitución de cemento por catalizador gastado CCF que mejor comportamiento presentó fue el de 5%, debido a que con el mismo se obtuvo un valor promedio de resistencia a compresión mayor que la mezcla patrón, un índice de actividad puzolánica de 1,04 y no produjo variaciones importantes al tiempo de fraguado.

En segunda instancia las sustituciones del 10 y 15% de cemento por residuo CCF son aplicables, ya que generaron resultados de resistencia a compresión muy cercanos a los de la mezcla patrón. Los valores promedios de resistencia obtenidos para cada mezcla superaron el valor promedio presentado en el certificado de calidad del cemento. Además el índice de actividad puzolánica, calculado en cada caso, superó el valor mínimo establecido por la norma.

Las mezclas con sustitución de 20, 25 y 30% de cemento por CCF gastado obtuvieron resultados poco favorables, con una disminución de más del 40% de la resistencia a compresión respecto a la mezcla patrón. Sumado a esto, no cumplieron con el valor mínimo del índice de actividad puzolánico que exige la norma, razón por la cual no es recomendable.

Debido a la realización de una pequeña cantidad de ensayos (2 ensayos por mezcla y por edad de curado), no se pudo establecer gráficos de tendencia en donde se representara los valores individuales y se visualizara una dispersión más cercana a la realidad. Se realizaron gráficos de resistencia media obtenida en función del porcentaje de residuo CCF utilizado en la mezcla para cada edad de curado, así como un gráfico donde se contrasta la resistencia media obtenida para cada una de las muestras en relación a su edad de ensayo.

El peso unitario compactado de las mezclas se vio disminuido en la medida en que se adiciona el catalizador gastado.

La adición de catalizador gastado CCF a la mezcla de la pasta provocó una mayor demanda de agua para cumplir con la consistencia normal establecido en la norma. Si se añade agua a la mezcla, aumentaría la relación agua/cemento y en consecuencia disminuiría la resistencia a compresión. Una solución para solventar esta disyuntiva sería el aumento de la pasta manteniendo la relación agua/cemento o la incorporación de aditivos plastificantes a las mezclas con residuo de catalizador.

La variabilidad en la dosificación de agua en el ensayo de tiempo de fraguado para cumplir con la consistencia normal que debe tener la pasta de cemento incorporó al experimento cierta incertidumbre que impidió determinar la influencia del residuo del catalizador CCF sobre el tiempo de fraguado de forma precisa

Al mantener constante las dosificaciones de agua y de arena en las mezclas de mortero y disminuir las proporciones de cemento para añadir CCF gastado, se generó una disminución de la fluidez de la mezcla.

Al aumentar la cantidad de CCF gastado en las mezclas, se incrementó el tiempo de fraguado inicial y final de las mezclas. Sin embargo, estos resultados pudieron estar influenciados por la incorporación de agua a la pasta para cumplir con la consistencia normal estipulado en la norma.

Finalmente, es importante resaltar la inclusión de las técnicas microscópicas en el estudio del comportamiento de morteros y concretos ya que existe una relación plena entre la microestructura de los materiales y sus propiedades. Esto permitirá avances importantes en la tecnología del concreto en un futuro no muy lejano.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a futuras investigaciones, realizar la molienda del catalizador gastado CCF empleado en las mezclas hasta obtener valores similares de los parámetros granulométricos del cemento, con el objeto de homogeneizar el tamaño de partícula al momento de mezclar ambos materiales, y así aumentar su superficie específica y acelerar su velocidad de reacción con el agua.

Se deberán repetir los ensayos desarrollados en la presente investigación con la nueva granulometría, lo cual permitirá determinar si las diferencias en el tamaño de partícula que presentan los materiales en estado natural influenciaron en los resultados obtenidos.

Se recomienda incorporar el análisis termogravimétrico en pastas de cemento para determinar de forma más precisa la reactividad de los residuos de catalizador CCF respecto a la fijación de hidróxido cálcico liberado en la hidratación del cemento. Esta técnica experimental, conjuntamente con la realización de micrografías a las pastas de cemento, servirá para verificar el cambio de tendencia que se presentó en el ensayo de resistencia a la compresión de probetas cúbicas para las mezclas con porcentajes de 10 y 15% de CCF gastado.

Se invita a futuras investigaciones, realizar los ensayos de tiempo de fraguado manteniendo la dosificación de agua y agregando un aditivo plastificante; con lo cual se obtendrán resultados más concluyentes de la influencia del catalizador gastado CCF sobre esta propiedad.

En vista que los estudios fisicoquímicos de las muestras de cemento y de residuo CCF son costosos, aunado a la dificultad de conseguir el catalizador para fines

investigativos, se recomienda solicitar apoyo a Intevep, filial de PDVSA, para que ellos gestionen los permisos y entreguen a los próximos investigadores las muestras, así como prestar sus instalaciones las cuales están equipadas con laboratorios de última tecnología. Así mismo se recomienda solicitar muestras de los residuos de catalizador de cada refinería del país, a fin de caracterizarlos y determinar si se pueden utilizar como reemplazo del cemento.

Se recomienda mantener buenas relaciones con la Fábrica Nacional de Cemento (Concreteira San Antonio del Valle), la cual tiene un personal altamente calificado y sus laboratorios son de gran calidad para desarrollar los ensayos mecánicos a morteros y concretos en estado fresco y endurecido.

La viabilidad de aplicación de esta tecnología será determinada cuando se realice la sustitución parcial del cemento por CCF gastado en mezclas de concreto. Por tanto, el siguiente paso para el desarrollo de este proyecto que engloba dos principales industrias del país, es realizar ensayos en mezclas de mortero con arena de uso común en la industria de la construcción y luego en mezclas de concreto pero utilizando el porcentaje de CCF gastado que presente el mejor comportamiento determinado con anterioridad en las investigaciones con morteros donde se utilizó arena de Ottawa; con la finalidad de observar el comportamiento de los catalizadores gastados con los agregados finos y gruesos.

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.

BIBLIOGRAFÍA

ACI Committee 201.2R-01. *Guide to durable concrete*. Report. ACI 201R, American Concrete Institute. Detroit, EUA. (2001).

Agámez, P., Oviedo L., Navarro, U., Centeno, M., Odriozola, J. *Análisis de la microporosidad de catalizadores de FCC.*, Rev. Acad. Colomb. Cienc., Vol. 30, No. 115, 2006, pp. 271-278.

Bastidas Madeline M., Carvajal Enzo. (2006) *Evaluación de la calidad de los materiales de construcción para la elaboración de concretos y morteros en Ciudad Bolívar, Estado Bolívar*. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar, Escuela de Ciencias de la Tierra, Ciudad Bolívar, Venezuela, Trabajo de Grado Publicado, (p 224)

Bishop, M. *Hydration of Portland Cement*. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.cnx.org> [Consulta: 2012, Mayo 29].

Borrachero, M., Monzó, J., Payá, J., Mora, Vunda, Velásquez, S., Soriano, L. *El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento Pórtland: las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica*. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía 2002.

Comité Conjunto del Concreto Armado. *Ensayos de laboratorio y especificaciones*. (1976). Caracas.

Douglas, M.; Considine, P.E: *Tecnología del petróleo*. Publicaciones Marcombo, (1977)

Domone, P. L. *A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete*. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 29, 2007, pp. 1-12.

- Escardino, A; Amorós, J. L; Moreno, A; Sánchez, E: *Utilizing the used catalyst from refinery FCC units as a substitute for kaolin in formulating ceramic frits*. Waste Management and Research, vol. 3, (1995), pp. 569-578.
- Furimsky, E., *Review of spent refinery catalyst: environment, safety and utilization*. Catalysis Today, Vol. No.30, 1996, pp. 223-286.
- García, C. (2000). *Estudio de restricciones de la fraccionadora principal del Complejo de Desintegración Catalítica de la Refinería Cardón*. (Trabajo de grado). Caracas, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Química.
- García de Lomas, M., S. de Rojas, M., Frías, M., *Comportamiento científico-técnico de los cementos Portland elaborados con catalizador FCC.*, Monografía No. 412, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC, 2006.
- Gartner, E. *Industrially Interesting Approaches to low CO2 Cements*. Cement and Concrete Research, vol. 34 (2004), pp. 1489-1498.
- Grace Davison. (1996). *Guía para Craqueo Catalítico Fluidizado. (Parte 1)*. Baltimore, W.R. Grace & Co.- Conn
- Grace Davison. (1996). *Guía para Craqueo Catalítico Fluidizado. (Parte 2)*. Baltimore, W.R. Grace & Co.- Conn
- Jung-Hsiu, W., Wu, W., Hsu, K. *The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars*. Cement and Concrete Research, No. 33, 2003, pp. 245-253.
- Maroto, M; Blanco V, M; Palomo S., A. *Microestructura del Hormigón. Influencia sobre sus propiedades*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (1989).

- Meyers, R. A: *Handbook of petroleum refining processes*, Mc. Graw-Hill, (1996).
- Morales, A. (2010). *Tendencias del Mercado Mundial de catalizadores para refinación*.
[Revista en línea]. Consultado el 10 de octubre de 2012 en [http:// www.oei.es/ve](http://www.oei.es/ve)
- Norma Venezolana COVENIN 28:2002, Cemento Portland. Especificaciones.
- Norma Venezolana COVENIN 273:1998, Concreto, mortero y componentes. Terminología.
- Norma Venezolana COVENIN 349:1979, Cemento Portland. Método de Ensayo Gravimétrico para Determinar el Peso por Metro Cúbico, Rendimiento y Contenido de Aire en el Concreto.
- Norma Venezolana COVENIN 484:1993, Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8 mm de lado.
- Norma Venezolana COVENIN 487:1993, Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad.
- Norma Venezolana NVF 489:2006, Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del tamiz COVENIN 45 micras (#325).
- Norma Venezolana COVENIN 492:1994, Cemento Portland. Determinación de la densidad real.
- Norma Venezolana COVENIN 493:1992, Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat.
- . Norma Venezolana COVENIN 494:1994, Cemento Portland. Determinación de la consistencia normal.

Norma Venezolana COVENIN 3135:94, Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica.

Norma Venezolana COVENIN 3549:99, Tecnología del concreto. Manual de elementos de estadística y diseño de experimentos.

Pacewska, B., Wilinska, I., Kubissa, J. *Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive*. *Termochimica acta*, No. 322, 1998, pp. 175-181.

Pacewska, B., Wilinska, I., Bukowska, M. *Hydration of cement slurry in the presence of spent cracking catalyst*. *Thermal Analysis and Calorimetry*, No. 60, 2000, pp. 71-78.

Pacewska, B., Burowska, M., Ska, I., Swat, M., *Modification of properties of concrete by a new pozzolan a waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp. 145-152.

Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M., *Physical, Chemical and mechanical properties of fluid catalyst residue (FC3R) blended cements*. *Cement and Concrete Research*. Vol (2001), pp. 57-61.

Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M., Velázquez, S. *Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R), Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes*. *Cement and Concrete Research*, No. 33, (2003). pp. 603-609.

Petróleos de Venezuela S.A. (2012). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.pdvsa.com> Consultado: 10 de octubre de 2012.

Price, L., Worrel, E., Phylipsen, D., *Energy Use and Carbon Dioxide de emissions in Energy-Intensive Industries in Key developing Countries*. Proceedings of the 1990 Earth Technologies Forum. Washington, DC. (1999), pp 27-29.

Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. (2009). *Manual del Concreto Estructural*. Caracas: SIDETUR.

Rosario, Roberto; Rodríguez, Ivan; Acevedo José; Porrero, Joaquín; Espinoza Alvaro. (1980). *Curso sobre "TECNOLOGIA DEL CONCRETO"*. Ciudad Guayana. Asociación Venezolana de Productores de Cemento.

Roskovic, R., Bjegovic, D., *Role of mineral additions in reducing CO2 emission*. Cement and Concrete Research. Vol. 35 (2005), pp. 974-978.

Soriano, M. L., *Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC)*. Tesis presentada a la Universidad Politécnica de Valencia, para optar al grado de Doctor (2008).

Su, N, Fang, H., Chen, Z., Liu, F. *Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution*. Cement and Concrete Research, Vol. No. 30, 2000, pp. 1773-1783.

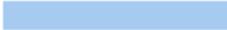
US Silica C.A. (2012). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.ussilica.com>

Venezuela de Verdad. (2012). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.venezueladeverdad.gob.ve/content/cemento-venezolano>

Zornoza, E., Garcés, P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. *Accelerated carbonation of cement pastes partially substituid with fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R)*. Cement and Concrete Composites, Vol. 31, 2009, pp. 134-13.

APÉNDICE A: Certificado de calidad del cemento utilizado

(Fuente: Fábrica Nacional de Cemento)

		PO-OD-R-29	
		GERENCIA DE OPTIMIZACION INFORME DE LABORATORIO	
		ULTRA	
MATERIAL:		CEMENTO PORTLAND TIPO I - R	
PUNTO DE DESPACHO:		SILO 1	
PLANTA OCUMARE DEL TUY			
CERTIFICADO DE CALIDAD		20-Ago-12	
VARIABLES	UNIDAD	REQUISITOS COVENIN 28	*VALOR PROMEDIO EN ULTIMOS 15 DIAS
ANÁLISIS FÍSICO			
SUP. BLAINE	m ² /kg	280 mínimo.	386
Fraguado Inicial Vicat	minutos	> 45 min	102
Fraguado Final Vicat	minutos	< 480 min	231
Resistencia Compresión, 3 Días	MPa	> 13,0	23,1
Resistencia Compresión, 7 Días	MPa	> 20,9	31,0
Resistencia Compresión, 28 Días	MPa	> 33,3	38,7
ANÁLISIS QUÍMICO			
SO ₃	%	4,0 Máx	2,60
P.F.	%	5,5 Máx	1,2
R.I.	%	1,5 Máx	0,5
OBSERVACIONES			
El presente certificado corresponde al promedio de la molienda del cemento Tipo IR- Ultra de las producciones desde el : 13/08/12 hasta 19/08/12			
Valido desde el 20/08/12 al 26/08/12		 JEFE DE CALIDAD YULY REYES	

APÉNDICE B: Hoja de seguridad del catalizador CCF

(Fuente: www.pdvsa.com)

1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DE LA EMPRESA

Nombre del producto: XTREME - Catalizador para craqueo catalítico fluidizado.

Página: 1/4.

Fabricante: Fábrica Carioca de Catalisadores S.A.

Última Revisión: 02/02/2012.

Teléfono Emergencia: +55 21 2195-8250.

2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Este preparado, hasta donde se sabe, no presenta peligros para el medio ambiente. En el caso de que tenga que ser desechado se le puede considerar inerte, conforme norma ABNT 10.004/2004.

PUEDA PRODUCIR IRRITACIONES EN LA PIEL, OJOS Y APARATO RESPIRATORIO POR CONTACTO PROLONGADO.

3. COMPOSICIÓN E INFORMACIONES SOBRE LOS INGREDIENTES

Nombre químico: Sílico aluminato de tierras raras

Composición e información de los ingredientes:

Nombre químico	% Peso / Peso	Número do CAS
Óxido de silicio amorfo	2,0 a 60,0	7631-86-9
Zeolita	5,0 a 45,0	1318-02-1
Óxido de aluminio	25,0 a 60,0	1344-28-1
Caolín	10,0 a 45,0	1332-58-7
Óxidos de tierras raras	0,0 a 10,0	68188-83-0

4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Saque la persona al aire libre. Si su respiración se hace difícil, puede administrársele oxígeno preferiblemente con asistencia. En el caso de que pare de respirar, hacerle respiración artificial. Acudir al médico.

Contacto con la piel: Lavar muy bien la región con jabón y agua abundante. Si persiste la irritación, acuda a un médico, quite la ropa contaminada y lávela antes de usarla nuevamente.

Contacto con los ojos: Lávese los ojos con bastante cantidad de agua clara durante 15 minutos como mínimo. Si la persona usa lentes debe retirarlas. Mantener los párpados abiertos durante el lavado para asegurarse que el agua penetre en todo el ojo y en la parte interna del párpado. No permitir que la persona se frote los ojos. Evitar el uso de agentes químicos, en esta situación tampoco deben usarse pomadas o aceites. Si sigue la irritación, acuda a un médico.

Ingestión: Lavar la boca con agua y beber posteriormente abundante agua potable.

Aviso al Médico: No se conoce ningún antídoto específico. Basado en la reacción individual de cada paciente, el médico deberá usar sus propios criterios para controlar los síntomas y las condiciones clínicas.

5. MEDIDAS PARA EL COMBATE DE INCENDIOS

Método de extinción: El producto que no fue usado no se encenderá. Si algún catalizador está involucrado en un incendio usar neblina de agua, polvo químico seco o CO₂ para apagarlo, y hay que tener en cuenta la clase más restrictiva de los equipos y del local donde el aditivo está almacenado.

Protección de las personas involucradas en el combate a incendio: Como en cualquier incendio, se debe impedir la exposición de personas a las llamas, humareda o cualquiera otro producto de combustión. Evacuar a todas las personas que no sean indispensables en el local de incendio. Los bomberos deberán usar máscaras completas con aparatos de respiración y protecciones especiales.

Diagrama Hommel

NFPA DE RIESGO: Salud: 1 Incendio: 0 Reactividad: 0 Otros: Ninguno

0 - Mínimo 1 - Ligeramente 2 - Moderado 3 - Alto 4 - Extreme - Peligro crónico para la salud (véase el apartado 11).

6. MEDIDAS DE CONTROL PARA DERRAMAMES O FUGAS

Evitar Precauciones personales: Evitar respirar el polvo formado. Para protección personal vea ítem 8.

Remoción de fuentes de ignición: No aplicable.

Precauciones para el medio ambiente: No hay recomendación especial, y basta recoger el producto por barradura o aspiración.

Métodos para limpieza: Evitar formación de polvo cuando del recogimiento, usar máscara contra polvo. Recoger el máximo del producto en contenedor limpio para reuso o disposición adecuada.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación: Evitar contactos prolongados y/o repetidos con la piel y los ojos, así como las inhalaciones del producto durante su manipulación. Al manipularlo se debe evitar que se forme polvo.

Almacenamiento: Evite humedecer o mojar el producto, pues dificulta la manipulación.

Prevención de incendio y explosión: Evitar formación de polvo. Evitar formación de electricidad estática en el área de manipulación.

Medidas de higiene: Evitar comer, beber y fumar en las áreas de trabajo; lavarse las manos después de manipular el producto químico; remover ropas contaminadas y equipo de protección antes de entrar en áreas de alimentación.

Medidas técnicas apropiadas: En las áreas donde se genera polvo debe haber ventilación adecuada para minimizar la exposición personal.

8. CONTROL DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN INDIVIDUAL

Medidas de control de ingeniería: Eliminar la circulación o acumulación de polvo en el aire con ventilación.

Límites de exposición ocupacional: No hay límite establecido para el producto. A continuación hay el límite de exposición para los componentes:

Nombre químico	Límite de exposición TLV-TWA conforme ACGIH	Límite de exposición conforme OSHA PEL
Óxido de silicio amorfo (1)	10,0 mg/m ³	TWA 16 mg/m ³
Zeolita	No establecido	No establecido
Óxido de aluminio	10,0 mg/m ³	TWA 15 mg/m ³ (total) TWA 5 mg/m ³ (respirable)
Caolín	2,0 mg/m ³	TWA 15 mg/m ³ (total) TWA 5 mg/m ³ (respirable)
Óxidos de tierras raras	No establecido	No establecido

Nota (1) Tenor de sílice cristalina de 0 a 1 % y de partículas inhalables menor que 10 micra de 0 a 0,1 % en el producto.

Protección respiratoria: En el caso de que las operaciones de manipulación produzcan polvo, se deberá usar una máscara respiratoria.

Protección de los ojos/rostro: Se recomienda el uso de anteojos protectores (tipo amplia visión), cuando haya formación de polvo durante la manipulación del producto.

Protección de la piel y del cuerpo: El contacto de la piel con el producto debe ser minimizado por el uso de vestimenta adecuada de protección y guantes seleccionados con respecto a la condición de uso potencial de exposición.

9. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

Aspecto: Polvo de libre escurrimiento, particulado, blanco a gris
Olor: Inodoro
pH: No determinado
Punto de fusión: Mayor que 1200 °C
Punto de ebullición: No determinado
Punto de fulgor: No aplicable
Temperatura de auto ignición: No aplicable
Temperatura de descomposición: No aplicable
Inflamabilidad: No aplicable (producto no es combustible)
Límite inferior/superior de inflamabilidad o explosividad: No aplicable
Presión de vapor: No es relevante
Densidad de vapor: No aplicable.
Densidad aparente: 600-950 kg/m³
Solubilidad en agua: No relevante
Coeficiente de partición – n-octanol/agua: No determinado
Viscosidad: No aplicable

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Reactividad: No aplicable
Estabilidad química: El producto es estable
Posibilidad de reacciones peligrosas: No determinado
Condiciones a evitar: Humedad excesiva
Materiales o sustancias incompatibles: No conocido
Productos peligrosos de la descomposición: No hay productos peligrosos de descomposición conocida

11. INFORMACIONES TOXICOLÓGICAS

Efectos de la exposición crónica a la inhalación

La inhalación prolongada o repetida puede causar irritaciones respiratorias, tos y mal estar en el pecho.

Efectos de la exposición crónica al contacto con la piel

El polvo puede tener un efecto de resecaamiento en la piel, como efecto de la exposición prolongada o repetida.

Son desconocidas las propiedades cancerígenas, mutagénicas o de reproducción humana, así como las de carácter embriotóxico de este producto.

No hay datos experimentales sobre toxicidad del producto. Se puede esperar para los elementos relacionados a la toxicidad aguda Oral LD50 > 5000 mg/kg.

12. INFORMACIONES TOXICOLÓGICAS

No son conocidos efectos, comportamientos e impactos de este producto al medio ambiente y a seres humanos. El producto puede ser considerado relativamente seguro para el medio ambiente y para seres humanos.

13. CONSIDERACIONES SOBRE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN

Métodos recomendados para tratamiento y disposición: El material que no pueda ser usado o químicamente reprocesado, se debe disponerlo de acuerdo con la legislación local.

El producto después del uso se le puede reprocesar para producción de argamasa, cemento, ladrillo de arcilla y ladrillo prensado a frío por ser considerado puzolana artificial conforme norma de la NBR 5736 Cemento Portland puzolánico de 01/07/1991 y reglamentos legales aplicables.

Envase usado: El desecho de los recipientes y embalajes deben seguir la legislación aplicable.

14. INFORMACIONES SOBRE TRANSPORTE

Transporte terrestre

Clase ADR: No restringido

Número ADR: No aplicable

Clase RID: No restringido

Número RID: No aplicable

Número ONU: No aplicable

Transporte fluvial y marítimo

Código IMO/IMDG: No restringido

Grupo de envase: No aplicable

Número ONU: No aplicable

EMS: No aplicable

MFAG: No es relevante

Contaminante Marino: No aplicable

Transporte aéreo

ICAO-TI/IATA-DGR

Número ONU: No aplicable

Grupo de envase: No aplicable

Nombre apropiado para embarque: No aplicable

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

Nombre del producto: XTREME - Catalizador para craqueo catalítico fluidizado.

Página: 4/4.

Última Revisión: 02/02/2012.

15. REGLAMENTACIONES

NBR 14725/2008

Etiquetado de acuerdo con la directiva de la Comunidad Europea

Símbolo: No aplicable.

Frase de riesgo: No aplicable.

Frase de seguridad: S22: No respirar el polvo formado. S26: En caso de contacto con ojos lavar con abundante agua y acudir al médico.

16. OTRAS INFORMACIONES

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (USA)

TLV-TWA: Threshold Limit Values Time-Weighted Average (concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada normal de 8 horas diarias y 40 horas semanales)

OSHA PEL: Occupational Safety and Health Administration Permissible Exposure Limits (USA).

ADR/RID: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. (Acuerdo Europeo concerniente a la carga de materiales peligrosos por carretera/ferrocarril)

IMO IMDG Code: International Maritime Org. Dangerous Goods Code. (Organización Marítima Internacional)

ONU: Organización de las Naciones Unidas

EMS: Environmental Management Systems

MFAG: Medical First Aid Guide for Use in Accidents Involving Dangerous Goods by International Maritime Organization

ICAO-TI: International Civil Aviation Organization - Technical Instructions. (Organización Internacional de Aviación Civil)

IATA-DGR: International Air Transport Association - Dangerous Goods Regulations. (Asociación Internacional de Transporte Aéreo)

NBR: Norma Brasileña

Las informaciones aquí contenidas se basan en el actual nivel de conocimiento de la empresa. El usuario del producto es responsable por el cumplimiento de las leyes y determinaciones existentes.

APÉNDICE C: Características de la arena de Ottawa

Tabla C.1 Granulometría de la arena de Ottawa utilizada en los ensayos

(Fuente: www.ussilica.com)

USA STD SIEVE SIZE		TYPICAL VALUES		
MESH	MILLIMETERS	% RETAINED		% PASSING
		INDIVIDUAL	CUMULATIVE	CUMULATIVE
16	1.180	0.0	0.0	100.0
30	0.600	2.0	2.0	98.0
40	0.425	28.0	30.0	70.0
50	0.300	45.0	75.0	25.0
100	0.150	23.0	98.0	2.0
Pan		2.0	100.0	0.0

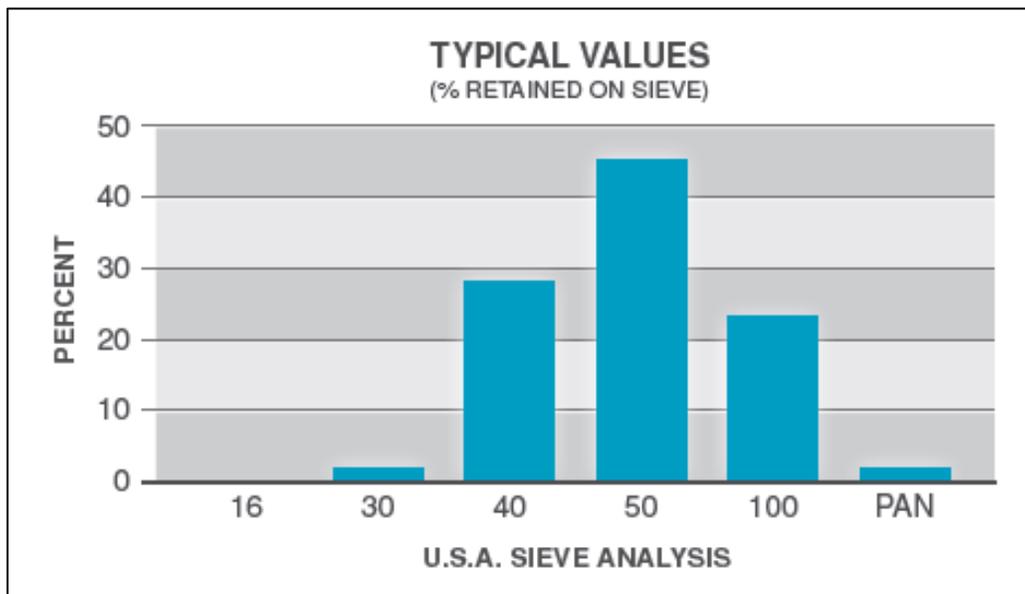


Gráfico C.1 Granulometría de la arena de Ottawa.(Fuente: www.ussilica.com)

Tabla C.2 Propiedades típicas de la arena de Ottawa (Fuente: www.ussilica.com)

TYPICAL PROPERTIES	
Color	White
Grain Shape	Round
Hardness (Mohs)	7
Melting Point (Degrees F)	3100
Mineral	Quartz
pH	7
Specific Gravity	2.65

Tabla C.3 Composición química típica de la arena de Ottawa (Fuente: www.ussilica.com)

TYPICAL CHEMICAL ANALYSIS, %	
SiO ₂ (Silicon Dioxide)	99.7
Fe ₂ O ₃ (Iron Oxide)	0.020
Al ₂ O ₃ (Aluminum Oxide)	0.06
TiO ₂ (Titanium Dioxide)	0.01
CaO (Calcium Oxide)	<0.01
MgO (Magnesium Oxide)	<0.01
Na ₂ O (Sodium Oxide)	<0.01
K ₂ O (Potassium Oxide)	<0.01
LOI (Loss On Ignition)	0.1

APÉNDICE D: Difractogramas de Rayos X de las muestras estudiadas

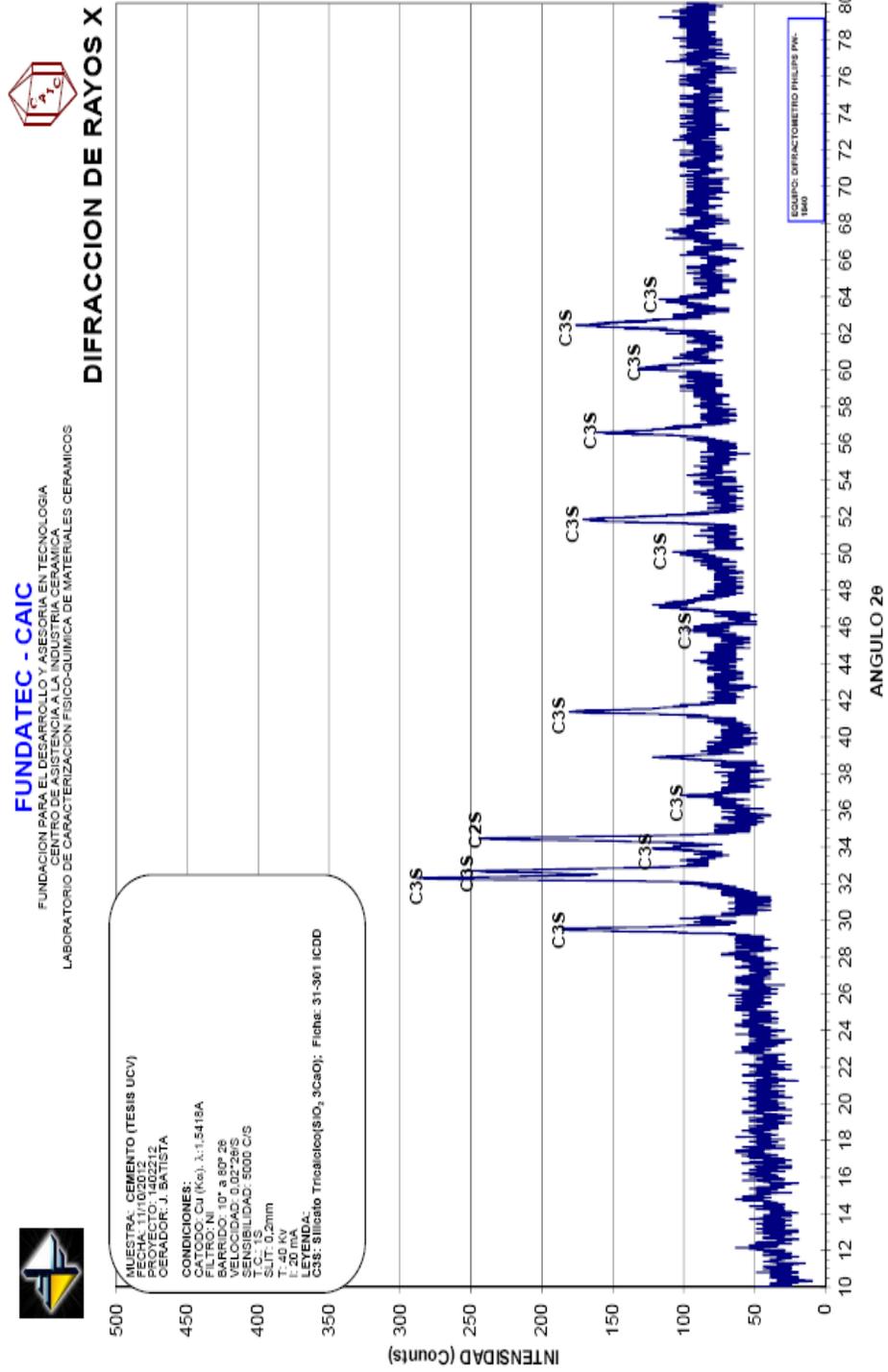


Gráfico D.1 Difractograma del cemento



FUNDATEC - CAIC

FUNDACION PARA EL DESARROLLO Y ASESORIA EN TECNOLOGIA
CENTRO DE ASISTENCIA A LA INDUSTRIA CERAMICA
LABORATORIO DE CARACTERIZACION FISICO-QUIMICA DE MATERIALES CERAMICOS



DIFRACCION DE RAYOS X

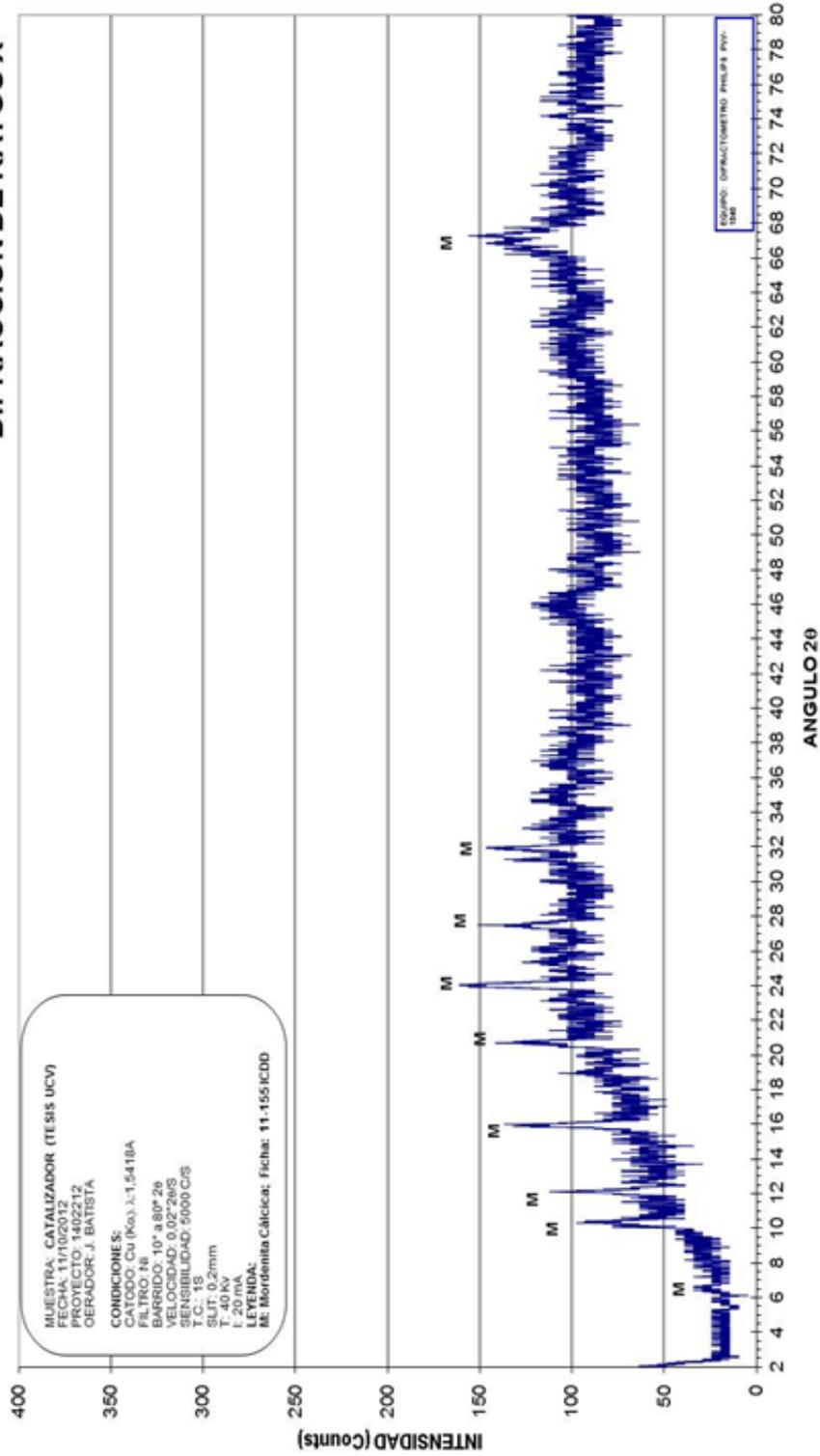


Gráfico D.2 Difractograma del catalizador FCC

APÉNDICE E: Granulometría laser de las muestras estudiadas

CAIC Centro de Asistencia a la Industria Cerámica REPORTE DE RESULTADOS

Muestra: CEMENTO - Average

SOP Utilizado: Cemento

Fecha: jueves, 11 de octubre de 2012 15:02:14

Origen y Tipo de Muestra: TESIS UCV (Ignacio)

Operador: Jesús Batista

Fecha de Analisis: jueves, 11 de octubre de 2012 15:02:14

Lote de referencia de la Muestra: 111012-1

Resultados Obtenidos por: Averaged

Observaciones:

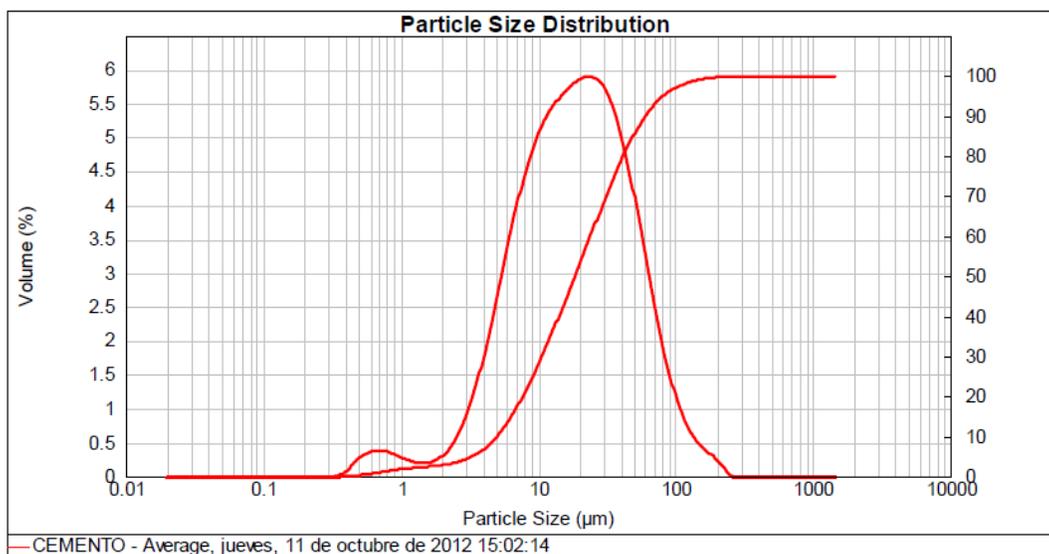
Tipo de Partículas: Cement	Densidad de la muestra: 3.140 g/cc	Accesorio: Hydro 2000G (A)
Ind. Ref. Partículas: 1.680	Modelo de Analisis: General purpose	Obscuracion: 8.69 %
Absorción: 0.1	Rango de Medicion: 0.020 Hasta 1478.000 um	
Dispersante Utilizado: Ethanol	Emulacion de Resultados: Off	RESIDUAL: 8.763 %
Ind. Ref. del Dispersante: 1.360		
Concentracion: 0.0109 %Vol	D[4,3] = 27.438 um	Area de Superficie Especifica: 0.215 m ² /g
Amplitud: 2.979	D[3,2] = 8.891 um	Uniformidad: 0.976 um
Unidad de Resultados: Volume		Modal: 23.373 um

d (0.1) : 5.014 um

d (0.5) : 18.481 um

d (0.9) : 60.063 um

Size (um)	Vol Under %	Size (um)	Volume In %												
0.010	0.00	0.632	0.81	7.962	20.82	50.238	85.68	0.010	0.00	0.632	0.29	7.962	3.48	50.238	2.90
0.020	0.00	0.710	1.10	8.934	24.30	56.368	88.58	0.020	0.00	0.710	0.29	8.934	3.70	56.368	2.49
0.032	0.00	0.796	1.38	10.024	28.00	63.246	91.06	0.032	0.00	0.796	0.27	10.024	3.89	63.246	2.07
0.040	0.00	0.893	1.65	11.247	31.89	70.963	93.13	0.040	0.00	0.893	0.27	11.247	3.89	70.963	2.07
0.050	0.00	1.002	1.88	12.619	35.92	79.621	94.81	0.050	0.00	1.002	0.23	12.619	4.03	79.621	1.66
0.063	0.00	1.589	2.55	14.159	40.07	89.337	96.13	0.063	0.00	1.589	0.67	14.159	4.15	89.337	1.32
0.071	0.00	2.000	2.91	15.887	44.31	100.237	97.15	0.071	0.00	2.000	0.36	15.887	4.24	100.237	1.02
0.080	0.00	2.518	3.54	17.825	48.63	112.468	97.93	0.080	0.00	2.518	0.62	17.825	4.32	112.468	0.78
0.089	0.00	3.170	4.70	20.000	53.01	126.191	98.51	0.089	0.00	3.170	0.89	20.000	4.43	126.191	0.45
0.100	0.00	3.557	5.59	22.440	57.44	141.589	98.96	0.100	0.00	3.557	1.16	22.440	4.44	141.589	0.35
0.159	0.00	3.991	6.75	25.179	61.88	158.866	99.32	0.159	0.00	3.991	1.16	25.179	4.41	158.866	0.66
0.200	0.00	4.477	8.22	28.251	66.29	502.377	100.00	0.200	0.00	4.477	1.47	28.251	4.41	502.377	0.00
0.252	0.00	5.024	10.03	31.698	70.61	1002.374	100.00	0.252	0.00	5.024	1.81	31.698	4.32	1002.374	0.00
0.317	0.00	5.637	12.21	35.566	74.78	2000.000	100.00	0.317	0.00	5.637	2.17	35.566	4.17	2000.000	0.00
0.399	0.04	6.325	14.74	39.905	78.73			0.399	0.04	6.325	2.53	39.905	3.95		
0.502	0.30	7.096	17.62	44.774	82.38			0.502	0.27	7.096	2.88	44.774	3.65		
								0.632	0.50	7.962	3.20	50.238	3.30		



CAIC Centro de Asistencia a la Industria Cerámica REPORTE DE RESULTADOS

Muestra: CATALIZADOR - Average

SOP Utilizado: Silice

Fecha: jueves, 11 de octubre de 2012 16:19:40

Origen y Tipo de Muestra: Empresa = TESIS UCV (Ignacio)

Operador: Jesús Batista

Fecha de Analisis: jueves, 11 de octubre de 2012 16:19:41

Lote de referencia de la Muestra: 111012-1

Resultados Obtenidos por: Averaged

Observaciones:

Tipo de Particulas: Silica 0.0

Densidad de la muestra: 2.650 g/cc

Accesorio: Hydro 2000G (A)

Ind. Ref. Particulas: 1.544

Modelo de Analisis: General purpose

Obscuracion: 13.81 %

Absorpcion: 0

Rango de Medicion: 0.020 Hasta 1478.000 um

Dispersante Utilizado: Water

Emulacion de Resultados: Off

RESIDUAL: 0.433 %

Ind. Ref. del Dispersante: 1.330

Concentracion: 0.1570 %Vol

D[4,3] = 88.379 um

Area de Superficie Especifica: 0.03 m²/g

Amplitud: 1.091

D[3,2] = 75.553 um

Uniformidad: 0.339 um

Unidad de Resultados: Volume

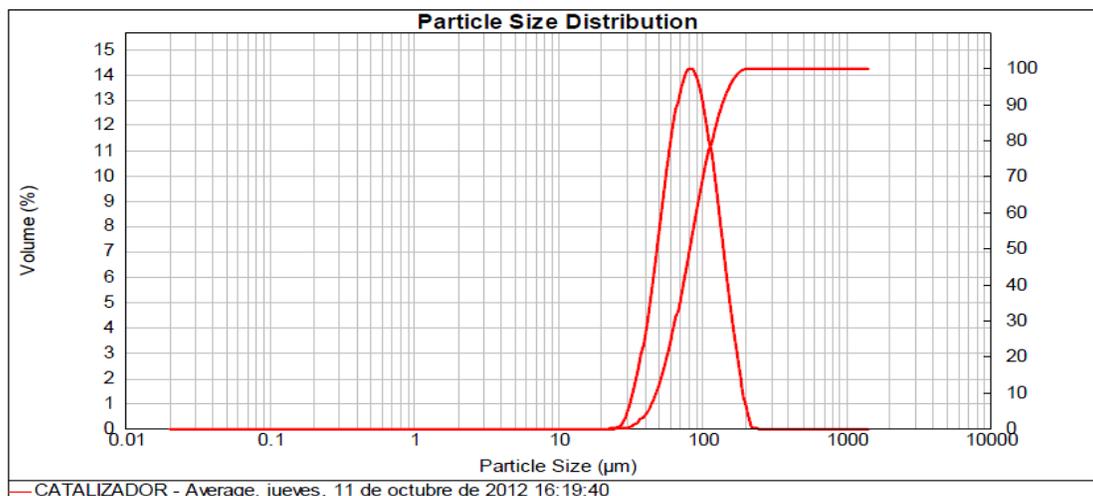
Modal: 83.278 um

d (0.1) : 48.181 um

d (0.5) : 82.272 um

d (0.9) : 137.943 um

Size (um)	Vol Under %	Size (um)	Volume In %												
0.010	0.00	0.632	0.00	7.962	0.00	50.238	11.98	0.010	0.00	0.632	0.00	7.962	0.00	50.238	6.65
0.020	0.00	0.710	0.00	8.934	0.00	56.368	18.64	0.020	0.00	0.710	0.00	8.934	0.00	56.368	8.25
0.032	0.00	0.796	0.00	10.024	0.00	63.246	26.89	0.032	0.00	0.796	0.00	10.024	0.00	63.246	9.60
0.040	0.00	0.893	0.00	11.247	0.00	70.963	36.49	0.040	0.00	0.893	0.00	11.247	0.00	70.963	10.46
0.050	0.00	1.002	0.00	12.619	0.00	79.621	46.95	0.050	0.00	1.002	0.00	12.619	0.00	79.621	10.72
0.063	0.00	1.589	0.00	14.159	0.00	89.337	57.67	0.063	0.00	1.589	0.00	14.159	0.00	89.337	10.31
0.071	0.00	2.000	0.00	15.887	0.00	100.237	67.98	0.071	0.00	2.000	0.00	15.887	0.00	100.237	9.31
0.080	0.00	2.518	0.00	17.825	0.00	112.468	77.28	0.080	0.00	2.518	0.00	17.825	0.00	112.468	9.31
0.089	0.00	3.170	0.00	20.000	0.00	126.191	85.11	0.089	0.00	3.170	0.00	20.000	0.00	126.191	7.82
0.100	0.00	3.557	0.00	22.440	0.00	141.589	91.23	0.100	0.00	3.557	0.00	22.440	0.00	141.589	6.12
0.159	0.00	3.991	0.00	25.179	0.00	158.866	95.59	0.159	0.00	3.991	0.00	25.179	0.00	158.866	4.36
0.200	0.00	4.477	0.00	28.251	0.06	502.377	100.00	0.200	0.00	4.477	0.00	28.251	0.06	502.377	4.41
0.252	0.00	5.024	0.00	31.698	0.45	1002.374	100.00	0.252	0.00	5.024	0.00	31.698	1.11	1002.374	0.00
0.317	0.00	5.637	0.00	35.566	1.56	2000.000	100.00	0.317	0.00	5.637	0.00	35.566	2.07	2000.000	0.00
0.399	0.00	6.325	0.00	39.905	3.63			0.399	0.00	6.325	0.00	39.905	3.40		
0.502	0.00	7.096	0.00	44.774	7.03			0.502	0.00	7.096	0.00	44.774	3.40		
								0.632	0.00	7.962	0.00	50.238	4.95		



APÉNDICE F: Análisis por microscopía electrónica de barrido y EDX

Proyecto: Tesis FCC
 Investigador: Ignacio Milles
 Compañía: U.C.V



Micrografía 1 de la muestra de CCF gastado

Muestra 1(5)

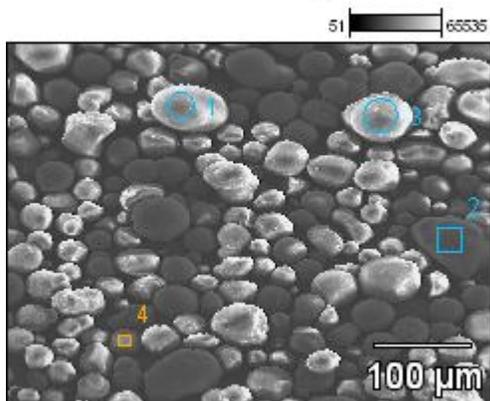
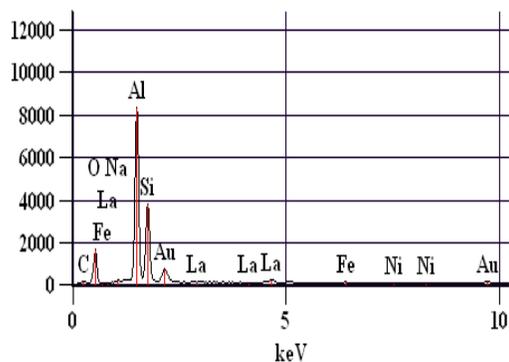


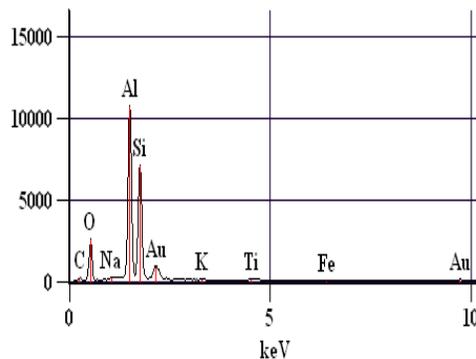
Image Name: Muestra 1(5)
 Accelerating Voltage: 20.0 kV
 Magnification: 100

Espectros del CCF gastado

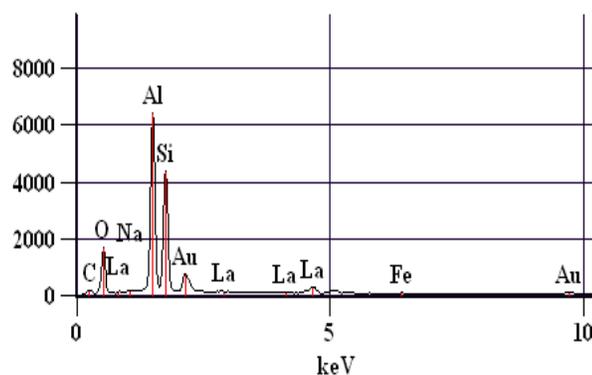
Full scale counts: 8330 Muestra 1(5)_pt1



Full scale counts: 10757 Muestra 1(5)_pt2



Full scale counts: 6407 Muestra 1(5)_pt3



Full scale counts: 8210 Muestra 1(5)_pt4

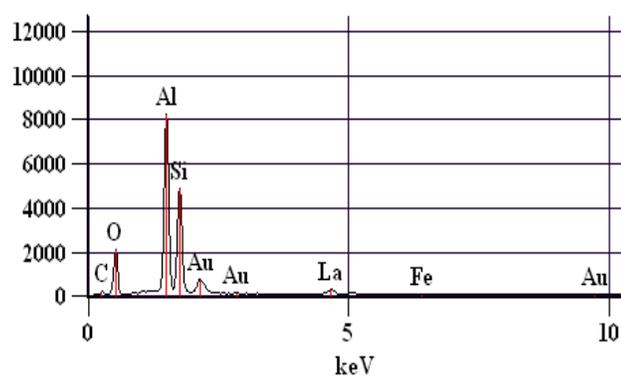


Tabla resumen del análisis químico semi-cuantitativo del CCF gastado

Muestra	% Peso								
	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	K-K	Ti-L	Fe-K	Ni-L	La-L
1(5)_Pto 1	13,92	0,98	54,07	24,32	---	---	0,34	0,69	5,69
1(5)_Pto 2	13,41	0,81	45,35	30,53	0,23	9,61	0,06	---	---
1(5)_Pto 3	15,13	0,81	43,34	29,58	---	---	0,04	---	11,10
1(5)_Pto 4	15,40	---	47,09	27,74	---	---	0,11	---	9,66

Micrografía 2 de la muestra de CCF gastado

Muestra 1(7)

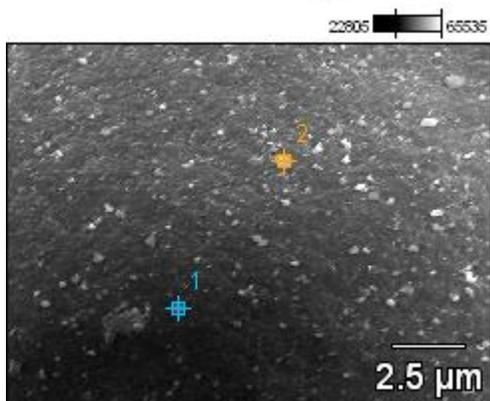
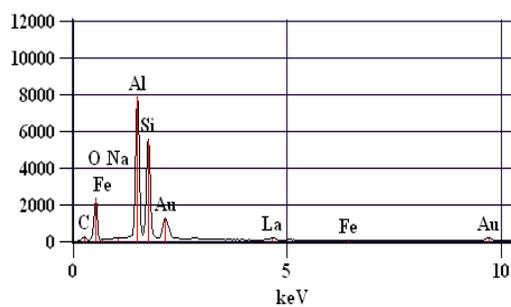


Image Name: Muestra 1(7)
 Accelerating Voltage: 20.0 kV
 Magnification: 3000

Espectros del CCF gastado

Full scale counts: 7846 Muestra 1(7)_pt1



Full scale counts: 8695 Muestra 1(7)_pt2

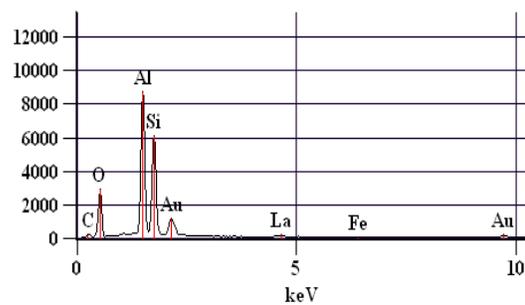


Tabla resumen del análisis químico semi-cuantitativo del CCF gastado

Muestra	% Peso					
	O-K	Na-K	Al-K	Si-K	Fe-K	La-L
1(7)_Pto 1	17,26	1,02	45,29	32,41	2,03	2,00
1(7)_Pto 2	19,52	---	44,96	31,84	1,76	1,92

Micrografías 3 y 4 de la muestra de CCF gastado

Muestra 1(6)

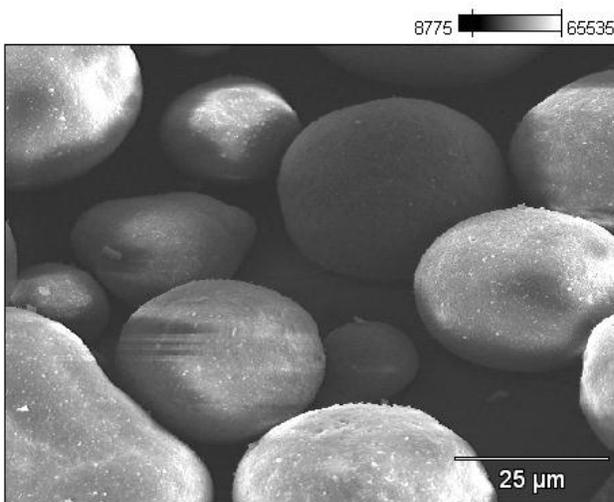


Image Name: Muestra 1(6)
Accelerating Voltage: 20.0 kV
Magnification: 500

Muestra 1(8)

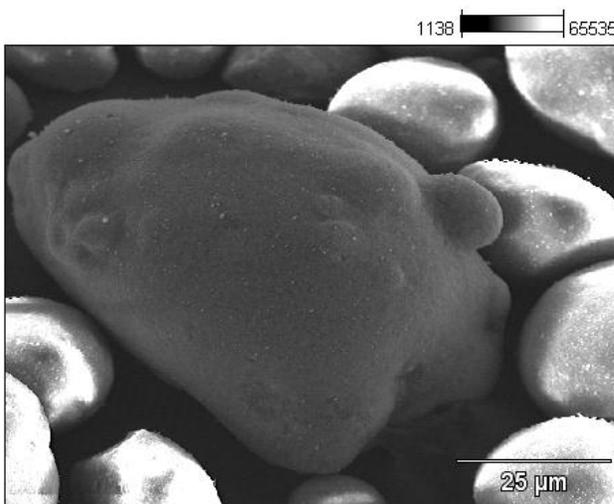


Image Name: Muestra 1(8)
Accelerating Voltage: 20.0 kV
Magnification: 500

Micrografía 1 de la muestra de cemento

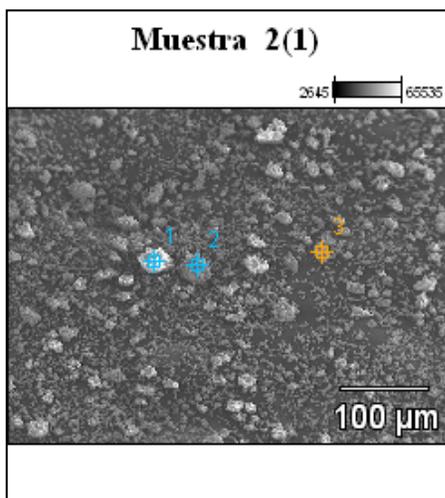
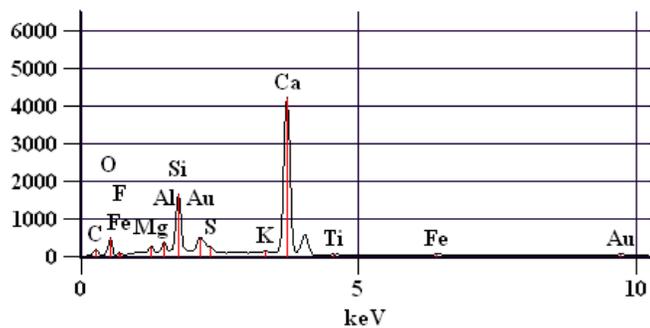


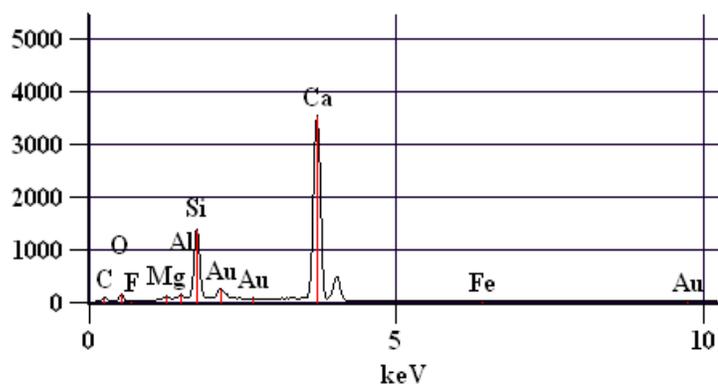
Image Name: Muestra2(1)
 Accelerating Voltage: 20.0 kV
 Magnification: 100

Espectros del cemento

Full scale counts: 4219 Muestra 2(1)_pt1



Full scale counts: 3542 Muestra 2(1)_pt2



Full scale counts: 1389 Muestra 2(1)_pt3

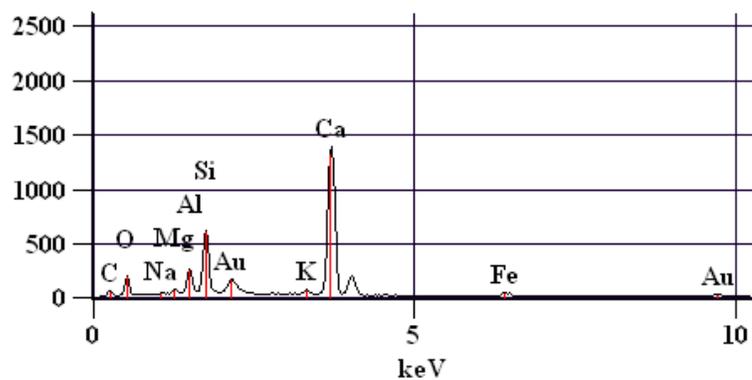


Tabla resumen del análisis químico semi-cuantitativo del cemento

Muestra	% Peso										
	O-K	F-K	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Ti-L	Fe-L
2(1)_Pto 1	5,41	0,44	---	2,11	2,72	15,16	2,20	1,16	61,51	7,51	1,77
2(1)_Pto 2	3,00	0,05	---	1,17	1,47	18,55	---	---	74,65	---	1,12
2(1)_Pto 3	7,34	---	0,87	1,81	6,90	16,73	---	1,74	60,72	---	3,90

Micrografía 2 de la muestra de cemento

Muestra 2(2)

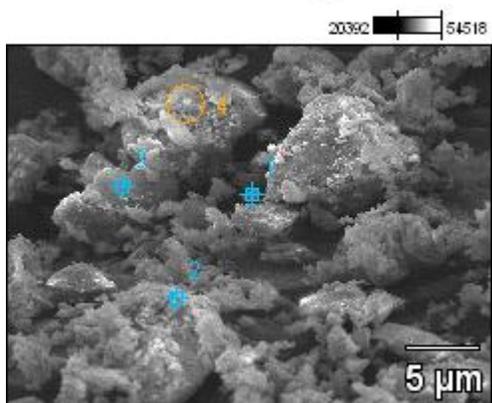
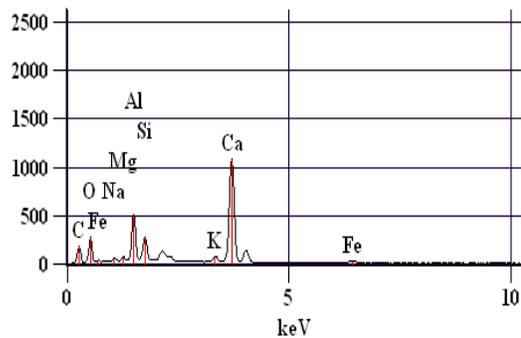


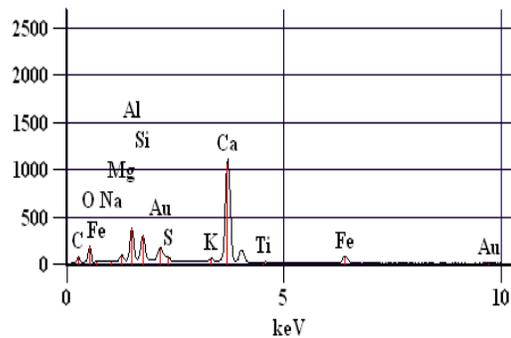
Image Name: Muestra 2(2)
 Accelerating Voltage: 20.0 kV
 Magnification: 1500

Espectros del cemento

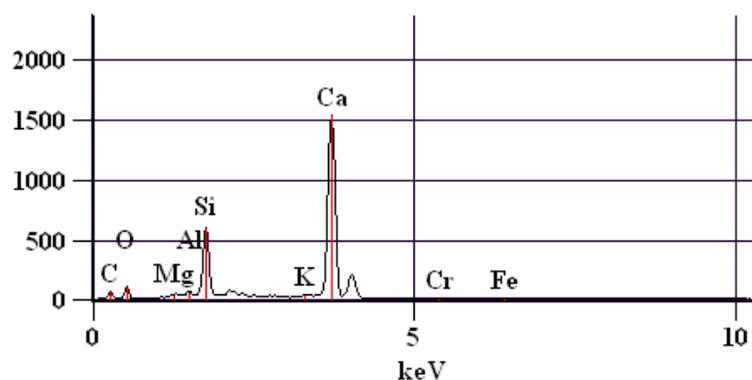
Full scale counts: 1081 Muestra 2(2)_pt1



Full scale counts: 1110 Muestra 2(2)_pt2



Full scale counts: 1537 Muestra 2(2)_pt3



Full scale counts: 1447 Muestra 2(2)_pt4

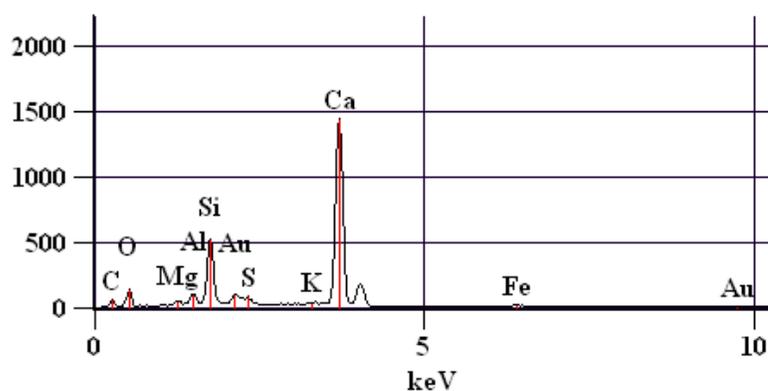


Tabla resumen del análisis químico semi-cuantitativo del cemento

Muestra	% Peso											
	O-K	Na-K	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	K-K	Ca-K	Ti-L	Cr-K	Fe-L	Zr-L
2(2)_Pto 1	10,81	1,78	1,86	15,28	8,07	---	2,74	48,90	---	---	4,34	6,24
2(2)_Pto 2	7,40	0,96	2,57	11,21	9,02	2,02	2,00	52,59	8,12	---	4,10	---
2(2)_Pto 3	2,99	---	1,19	1,66	18,46	---	1,04	73,69	---	0,14	0,84	---
2(2)_Pto 4	6,10	---	1,31	2,95	15,90	2,40	1,19	68,52	---	---	1,63	---

Micrografía 3 de la muestra de cemento

Muestra 2(3)

14960 64431

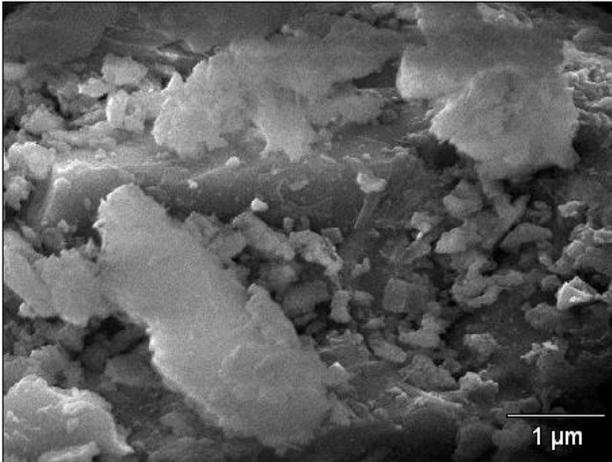


Image Name: Muestra 1(6)
Accelerating Voltage: 20.0 kV
Magnification: 8000

APÉNDICE G: Planillas del ensayo de densidad de las muestras estudiadas

Ensayo: Determinación de la densidad real

Norma: COVENIN 492:1994
Operador: Luz Mayre Calvete
Fecha de elab: 16 de Octubre de 2012
Temp de ensayo: 24°C
Variac de temp: 0°C

Muestra	Masa seca (g)	Vinicial (ml)	Vfinal (ml)	Vreal (ml)	Densidad real (g/cm ³)	Promedio (g/cm ³)	Desviación (g/cm ³)
Cemento I-R	65,0031	1	22,0	21,0	3,0953	3,09	0,01
	65,0090	1	22,1	21,1	3,0809		
Catalizador FCC	59,2730	1	24,0	23,0	2,5770	2,58	0,01
	59,2641	1	23,9	22,9	2,5879		

Nota: en el caso del catalizador se pesaron los 65 g que exige la norma, pero al momento de haber agregado los 59,2730 g ya se había desplazado el volumen completo del voluménometro por lo cual se tomo este peso como masa seca para el cálculo de la densidad.

APÉNDICE H: Planillas de los ensayos tipificados de las muestras estudiadas

ENSAYO DE CEMENTO	Código del Documento: PC-CC-R-05	
	Revisión: 1	Nº de Pág 1 de 1
Fecha de Elaboración: sep-12		
FECHA:	24/09/2012	
PLANTA:	CEMENTO	
PROCEDENCIA:	FNC	
PLACA:	SP	
TEMP. DE RECEPCION:	75°	
TEMP. DEL ENSAYO:	21°	
FINURA BLAINE		
PESO DE LA MUESTRA:	2,8954 g.	FORMULA $S = F \cdot \sqrt{T}$
TIEMPO (1):	80 s.	
TIEMPO (2):	82 s.	
TIEMPO:	81 s.	
FACTOR:	431,6122 $\text{cm}^2/\text{g} \times \text{s}^{1/2}$.	
SUPERFICIE:	388 m^2/Kg	
PESO INICIAL:	10,0006 g.	
PESO RETENIDO:	1,1715 g.	
RETENCIÓN TAMIZ 325(%)	11,7	
PASANTE TAMIZ 325(%)	88,3	

Figura H.1 Planilla de los ensayos tipificados del cemento. (Fuente propia)

ENSAYO DE FCC	Código del Documento: PC-CC-R-06	
	Revisión: 1	Nº de Pág 1 de 1
Fecha de Elaboración: sep-12		
FECHA:	24/09/2012	
PLANTA:	FCC NATURAL	
PROCEDENCIA:	AMUAY	
PLACA:	SN	
TEMP. DE RECEPCION:	SN	
TEMP. DEL ENSAYO:	21°	
FINURA BLAINE		
PESO DE LA MUESTRA:	0,0000 g.	FORMULA $S = F \cdot \sqrt{T}$
TIEMPO (1):	0 s.	
TIEMPO (2):	0 s.	
TIEMPO:	0 s.	
FACTOR:	431,6122 $\text{cm}^2/\text{g} \times \text{s}^{1/2}$.	
SUPERFICIE:	0 m^2/Kg	
PESO INICIAL:	10,0006 g.	
PESO RETENIDO:	8,6448 g.	
RETENCIÓN TAMIZ 325(%)	86,4	
PASANTE TAMIZ 325(%)	13,6	

NOTA: las partículas son muy grandes para comprimir con el émbolo

Figura H.2 Planilla de los ensayos tipificados del FCC. (Fuente propia)

APÉNDICE I: Planillas para el ensayo de tiempo de fraguado

Muestra Patrón (Ensayo 1)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO MUESTRA: 650 g.
AGUA DE AMASADO: 180 cm³.
HORA INICIO: 11:07 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION	
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.	
180	27.7	11	13:15	02:08	128	32	
						135	25
			13:24	02:17	137	23	
			13:31	02:24	144	19	
			13:39	02:32	152	4	
			14:44	03:37	217	0	

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 135

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 217

Muestra Patrón (Ensayo 2)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO MUESTRA: 650 g.
AGUA DE AMASADO: 180 cm³.
HORA INICIO: 11:20 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION	
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.	
180	27.7	11	13:28	02:08	128	31	
						134	25
			13:33	02:13	133	26	
			13:38	02:18	138	19	
			13:50	02:30	150	6	
			15:00	03:40	220	0	

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 134

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 220

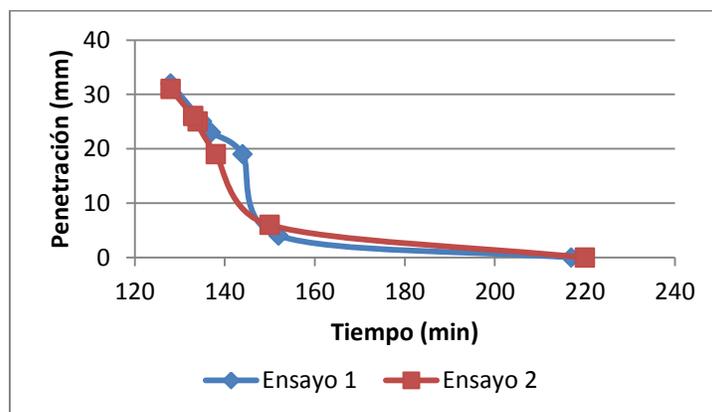


Figura I.1 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra patrón. (Fuente propia)

Muestra 5% FCC (Ensayo 1)
 CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 5% : 650 g.
 AGUA DE AMASADO: 180 cm³.
 HORA INICIO: 11:51 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
180	27,7	9	13:58	02:07	127	32
					136	25
			14:12	02:21	141	22
			14:19	02:28	148	11
			14:25	02:34	154	8
			15:35	03:44	224	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 136

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 224

Muestra 5% FCC (Ensayo 2)
 CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 5% : 650 g.
 AGUA DE AMASADO: 180 cm³.
 HORA INICIO: 12:03 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
180	27,7	10	14:07	02:04	124	33
					136	25
			14:21	02:18	138	24
			14:27	02:24	144	16
			14:32	02:29	149	7
			15:44	03:41	221	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 136

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 221

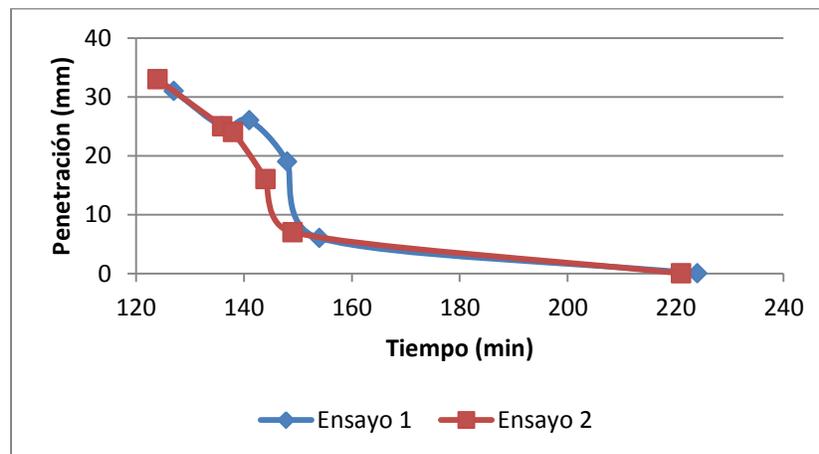


Figura I.2 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra con 5% de CCF gastado. (Fuente propia)

Muestra 10% FCC (Ensayo 1)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 10% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 180 cm³.
HORA INICIO: 07:46 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION	
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.	
180	27,7	9	09:52	02:06	126	33	
						135	25
			10:06	02:20	140	21	
			10:19	02:33	153	12	
			10:28	02:42	162	4	
			11:38	03:52	232	0	

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 135

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 232

Muestra 10% FCC (Ensayo 2)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 10% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 180 cm³.
HORA INICIO: 08:39 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION	
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.	
180	27,7	9	10:45	02:06	126	32	
						132	25
			10:52	02:13	133	24	
			10:58	02:19	139	13	
			11:02	02:23	143	3	
			12:30	03:51	231	0	

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 132

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 231

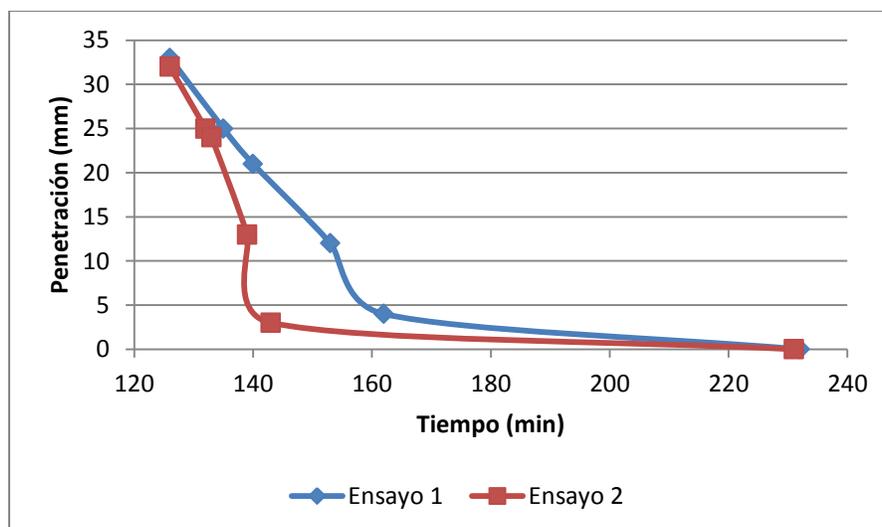


Figura I.3 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra con 10% de CCF gastado. (Fuente propia)

Muestra [15% FCC (Ensayo 1)]
 CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 15% : 650 g.
 AGUA DEAMASADO: 187 cm³.
 HORA INICIO: 09:24 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
187	28,8	9	11:29	02:05	125	32
					133	25
			11:37	02:13	133	25
			11:46	02:22	142	16
			12:03	02:39	159	3
			13:14	03:50	230	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 133

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 230

Muestra [15% FCC (Ensayo 2)]
 CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 15% : 650 g.
 AGUA DEAMASADO: 187 cm³.
 HORA INICIO: 10:01 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
187	28,8	9	12:03	02:02	122	38
					131	25
			12:12	02:11	131	26
			12:17	02:16	136	16
			12:30	02:29	149	4
			13:49	03:48	228	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 131

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 228

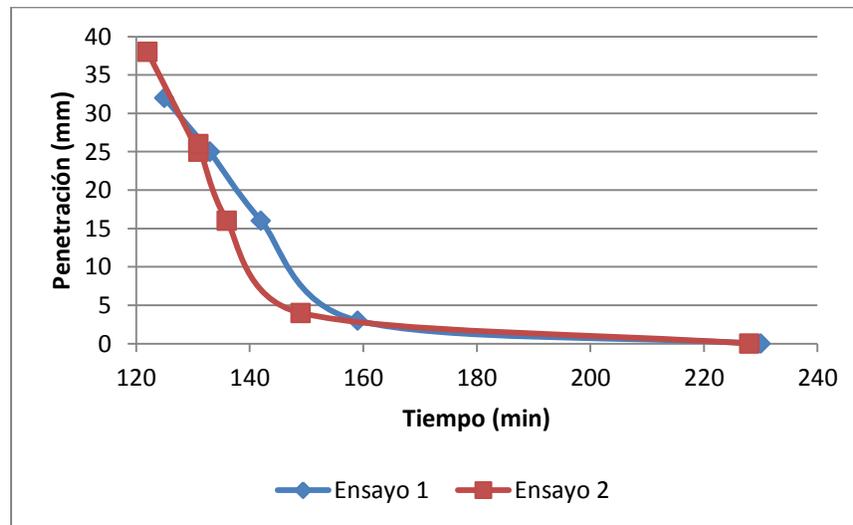


Figura I.4 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra con 15% de CCF gastado. (Fuente propia)

Muestra 20% FCC (Ensayo 1)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 20% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 195 cm³
HORA INICIO: 09:08 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
195	30,0	9	11:09	02:01	121	35
					139	25
			11:29	02:21	141	24
			11:38	02:30	150	13
			11:48	02:40	160	4
			12:59	03:51	231	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 139

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 231

Muestra 20% FCC (Ensayo 2)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 20% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 195 cm³
HORA INICIO: 09:32 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
195	30,0	10	11:50	02:18	138	34
					153	25
			12:07	02:35	155	24
			12:21	02:49	169	15
			12:26	02:54	174	7
			13:21	03:49	229	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 153

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 229

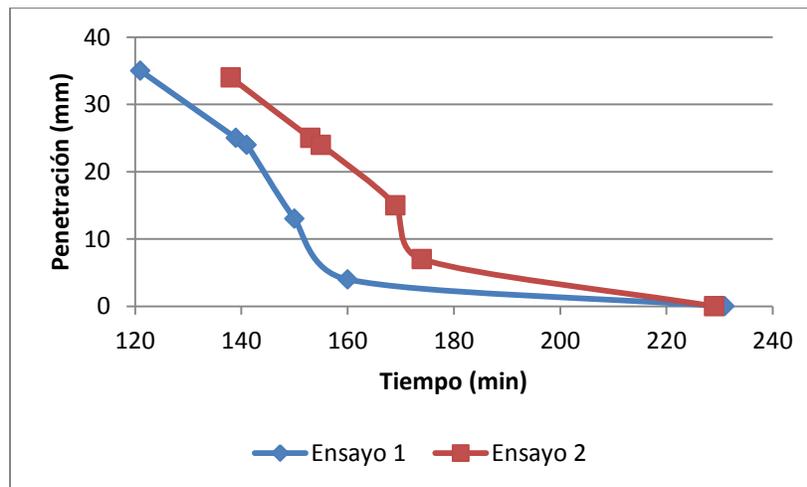


Figura I.5 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra con 20% de CCF gastado. (Fuente propia)

Muestra 25% FCC (Ensayo 1)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 25% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 200 cm³.
HORA INICIO: 09:46 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
200	30,8	10	12:05	02:19	139	32
					148	25
			12:16	02:30	150	24
			12:31	02:45	165	14
			12:41	02:55	175	14
			13:42	03:56	236	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 148

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 236

Muestra 25% FCC (Ensayo 2)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 25% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 200 cm³.
HORA INICIO: 10:06 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
200	30,8	9	12:22	02:16	136	34
					148	25
			12:38	02:32	152	22
			12:52	02:46	166	13
			13:00	02:54	174	3
			14:03	03:57	237	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 148

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 237

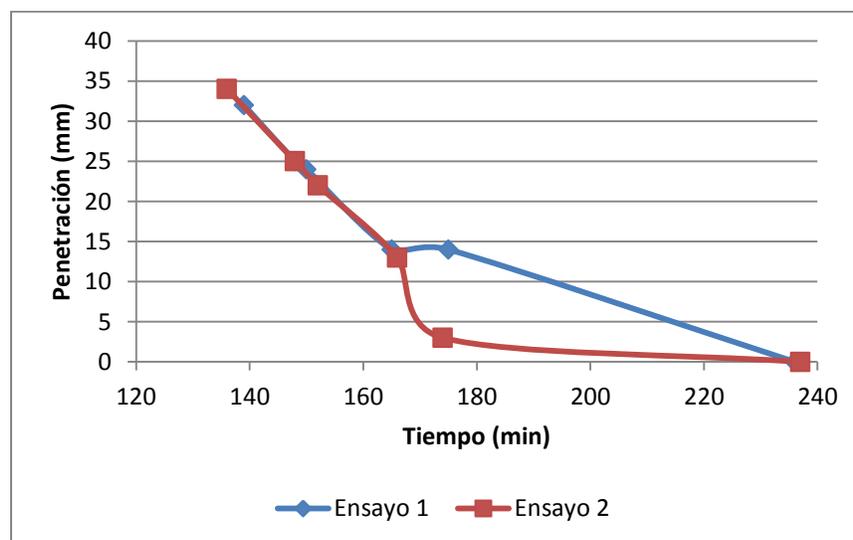


Figura I.6 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra con 25% de CCF gastado. (Fuente propia)

Muestra 30% FCC (Ensayo 1)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 30% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 215 cm³.
HORA INICIO: 10:41 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
215	33,1	9	13:07	02:26	146	31
					159	25
			13:18	02:37	157	26
			13:28	02:47	167	16
			13:42	03:01	181	3
			14:45	04:04	244	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 159

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 244

Muestra 30% FCC (Ensayo 2)
CONSISTENCIA NORMAL

PESO DE CEMENTO + FCC 30% : 650 g.
AGUA DE AMASADO: 215 cm³.
HORA INICIO: 10:53 a.m.

cm ³	%	mm.	HORA	TIEMPO		PENETRACION
			PENETRACIÓN	Horas	Minutos	mm.
215	33,1	9	13:10	02:17	137	36
					156	25
			13:33	02:40	160	23
			13:46	02:53	173	11
			13:53	03:00	180	4
			14:56	04:03	243	0

TIEMPO INICIAL DE FRAGUADO (min): 156

TIEMPO FINAL DE FRAGUADO (min): 243

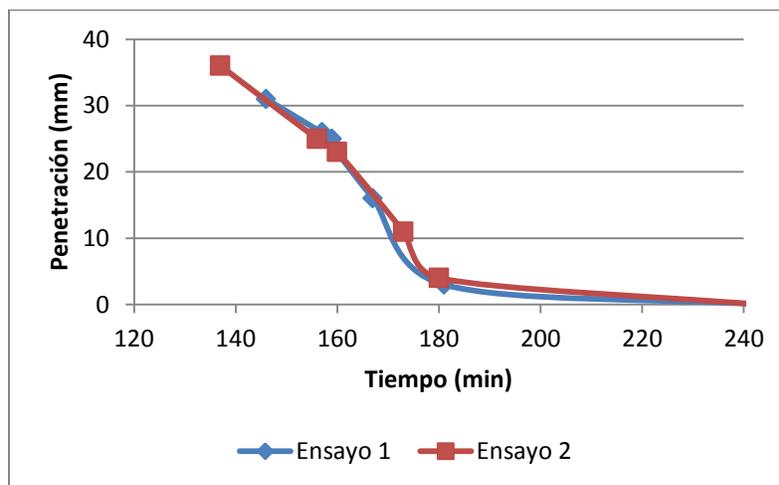


Figura I.7 Planilla del ensayo de tiempo de fraguado de la muestra con 30% de CCF gastado. (Fuente propia)

APÉNDICE J: Data del ensayo de Resistencia a compresión

Mezclas	Fecha de toma	Edad de Ensayo (días)	Peso (kgf)	Área (cm ²)	Carga máx (Kgf)	Tensión (Kgf/cm ²)	Tensión (Mpa)	R _{ts} (Mpa)	R _i (Mpa)	R _{tm} (Mpa)	R (Mpa)	S ₁ (Mpa)	V _i	CONTROL	S ₁ (Mpa)	CONTROL	Verif Máx de Serie	Verif mín de Serie
M-I (Patron)	24/09/2012	3	289.9	25	7625	305	29.9	29.4	1.51	29.6	1.15	0.68	2.29	EXCELENTE	0.3	EXCELENTE	1.6	2.9
	24/09/2012	3	290.5	25	7241	290	28.4											
	24/09/2012	3	290.1	25	7595	304	29.8	29.8	0.79	40.2	1.70	1.00	2.50	MUY BUENO	0.9	EXCELENTE	1.5	0.9
	25/09/2012	3	279.9	25	7736	309	30.3											
	25/09/2012	3	275.7	25	7535	301	29.6	39.6	0.97	40.2	1.70	1.00	2.50	MUY BUENO	0.9	EXCELENTE	0.7	0.4
	25/09/2012	3	277.4	25	7553	302	29.6											
	24/09/2012	7	293.3	25	10006	400	39.3	40.9	2.43	47.3	1.22	0.96	1.20	EXCELENTE	0.3	EXCELENTE	1.2	2.3
	24/09/2012	7	296.0	25	10254	410	40.2											
	24/09/2012	7	297.0	25	10032	401	39.4	46.8	0.69	47.1	0.96	1.83	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.9
	25/09/2012	7	286.8	25	10281	411	40.3											
	25/09/2012	7	284.6	25	10178	407	39.9	46.5	0.69	47.1	0.96	1.83	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.6
	25/09/2012	7	284.1	25	10797	432	42.4											
24/09/2012	28	295.0	25	11863	474	46.5	28.5	2.03	27.4	1.83	1.08	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.6	
24/09/2012	28	293.0	25	12165	487	47.7												
24/09/2012	28	290.0	25	12159	486	47.7	46.8	0.69	47.1	0.96	1.83	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.6	
25/09/2012	28	283.9	25	11899	476	46.7												
25/09/2012	28	283.4	25	11865	475	46.5	41.3	1.27	39.9	1.21	0.72	1.80	EXCELENTE	2.0	BUENO	2.1	1.3	
25/09/2012	28	283.9	25	12040	482	47.2												
24/09/2012	3	295.1	25	7455	298	29.2	38.5	1.16	27.4	1.83	1.08	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.6	
24/09/2012	3	295.2	25	6938	278	27.2												
24/09/2012	3	294.7	25	7387	295	29.0	26.4	1.63	27.4	1.83	1.08	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.6	
25/09/2012	3	278.2	25	6745	270	26.5												
25/09/2012	3	278.7	25	6522	261	25.6	41.3	1.27	39.9	1.21	0.72	1.80	EXCELENTE	2.0	BUENO	2.1	1.3	
25/09/2012	3	275.5	25	6938	278	27.2												
24/09/2012	7	294.3	25	10711	428	42.0	38.5	1.16	27.4	1.83	1.08	3.94	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.6	
24/09/2012	7	295.2	25	10387	415	40.7												
24/09/2012	7	295.2	25	10484	419	41.1	48.1	5.10	49.2	2.90	1.71	3.48	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.3	0.2	
25/09/2012	7	290.1	25	9623	385	37.7												
25/09/2012	7	290.4	25	9876	395	38.7	50.2	0.70	49.2	2.90	1.71	3.48	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.3	0.2	
25/09/2012	7	290.3	25	9918	397	38.9												
24/09/2012	28	298.0	25	11975	479	47.0	48.1	5.10	49.2	2.90	1.71	3.48	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.3	0.2	
24/09/2012	28	296.0	25	11767	471	46.2												
24/09/2012	28	298.0	25	13068	523	51.3	50.2	0.70	49.2	2.90	1.71	3.48	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.3	0.2	
25/09/2012	28	293.5	25	12907	516	50.6												
25/09/2012	28	297.7	25	12793	512	50.2	509	49.9	49.2	2.90	1.71	3.48	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.3	0.2	
25/09/2012	28	296.2	25	12729	509	49.9												

Mezclas	Fecha de toma	Edad de Ensayo (días)	Peso (kgf)	Área (cm ²)	Carga máx (kgf)	Tensión (Kg/cm ²)	Tensión (Mpa)	R _{ts} (Mpa)	R _i (Mpa)	R _{lim} (Mpa)	R (Mpa)	S _i (Mpa)	V _i	CONTROL	S _t (Mpa)	CONTROL	Verif Máx de Serie	Verif mín de Serie
M- III (10% FCC)	24/09/2012	3	290.8	25	5603	224	22.0										0.4	0.6
	24/09/2012	3	291.5	25	5716	229	22.4	22.4	0.67									
	24/09/2012	3	281.9	25	5774	231	22.6			22.8	1.35	0.80	3.50	BUENO	0.7	EXCELENTE		
	25/09/2012	3	282.7	25	6127	245	24.0										1.1	1.9
	25/09/2012	3	277.1	25	5608	224	22.0	23.3	2.04									
	25/09/2012	3	277.4	25	6082	243	23.9											
	24/09/2012	7	301.7	25	8114	325	31.8										0.4	0.7
	24/09/2012	7	300.1	25	8654	346	33.9	33.1	2.12									
	24/09/2012	7	297.7	25	8583	343	33.7											
	25/09/2012	7	290.9	25	8864	355	34.8			34.6	2.26	1.33	3.86	BUENO	2.0	BUENO		
	25/09/2012	7	289.3	25	9476	379	37.2	36.0	2.40								0.6	0.6
	25/09/2012	7	289.5	25	9189	368	36.0											
	24/09/2012	28	294.0	25	9356	374	36.7											
	24/09/2012	28	294.0	25	9009	360	35.3	36.5	2.26								2.1	2.4
24/09/2012	28	290.0	25	9585	383	37.6												
25/09/2012	28	296.6	25	9816	393	38.5			36.9	2.29	1.35	3.67	BUENO	0.5	EXCELENTE			
25/09/2012	28	294.9	25	9464	379	37.1	37.3	2.33								2.4	2.1	
25/09/2012	28	297.9	25	9223	369	36.2												
24/09/2012	3	291.2	25	4819	193	18.9											0.2	0.3
24/09/2012	3	290.0	25	4962	198	19.5	19.2	0.56										
24/09/2012	3	290.7	25	4902	196	19.2												
25/09/2012	3	279.1	25	5122	205	20.1			20.0	0.98	0.58	2.91	MUY BUENO	1.1	EXCELENTE			
25/09/2012	3	278.8	25	5271	211	20.7	20.8	1.40									0.7	0.6
25/09/2012	3	278.7	25	5480	219	21.5												
24/09/2012	7	288.2	25	7740	310	30.4											0.1	0.0
24/09/2012	7	289.6	25	7712	308	30.3	30.3	0.18										
24/09/2012	7	290.1	25	7695	308	30.2												
25/09/2012	7	292.0	25	6810	272	26.7			29.0	1.05	0.62	2.14	MUY BUENO	1.8	BUENO			
25/09/2012	7	293.5	25	7082	283	27.8	27.7	1.93									0.5	0.6
25/09/2012	7	292.5	25	7301	292	28.6												
24/09/2012	28	291.5	25	10418	417	40.9												
24/09/2012	28	292.4	25	10562	422	41.4	40.6	1.93									0.4	0.5
24/09/2012	28	293.1	25	10070	403	39.5												
25/09/2012	28	294.9	25	9333	373	36.6			39.2	2.10	1.24	3.16	BUENO	2.0	BUENO			
25/09/2012	28	295.2	25	9910	396	38.9	37.7	2.26									0.6	0.6
25/09/2012	28	296.0	25	9620	385	37.7												

Mezclas	Fecha de toma	Edad de Ensayo (días)	Peso (kgf)	Área (cm²)	Carga max (kgf)	Tensión (kgf/cm²)	Tensión (Mpa)	R _{ts} (Mpa)	R _i (Mpa)	R'bm (Mpa)	R (Mpa)	S _i (Mpa)	V _i	CONTROL	S _t (Mpa)	CONTROL	Verif Máx de Serie	Verif mín de Serie	
M- V (20% FCC)	24/09/2012	3	286.4	25	4954	198	19.4	18.7	1.18	17.7	1.13	0.67	3.77	BUENO	1.5	MUY BUENO	0.5	0.3	
	24/09/2012	3	289.1	25	4652	186	18.2												
	24/09/2012	3	290.7	25	4707	188	18.5	16.6	1.07										
	25/09/2012	3	292.3	25	4383	176	17.2												
	25/09/2012	3	288.6	25	4184	167	16.4	25.35	1.72	26.7	1.80	1.06	3.98	BUENO	1.9	BUENO	0.4	0.5	
	25/09/2012	3	286.8	25	4121	165	16.2												
	24/09/2012	7	290.3	25	6232	249	24.4	28.08	1.88										
	24/09/2012	7	289.7	25	6670	267	26.2												
	24/09/2012	7	289.9	25	6485	259	25.4	32.38	1.71	32.0	1.40	0.83	2.58	MUY BUENO	0.5	EXCELENTE	1.0	1.2	
	25/09/2012	7	291.0	25	7209	288	28.3												
	25/09/2012	7	288.4	25	7373	295	28.9	31.70	1.09										
	25/09/2012	7	288.0	25	6894	276	27.0												
24/09/2012	28	291.3	25	8242	330	32.3	18.16	0.59	17.2	1.08	0.64	3.70	BUENO	1.3	EXCELENTE	0.2	0.2		
24/09/2012	28	294.8	25	8044	322	31.6													
24/09/2012	28	295.7	25	8479	339	33.3	23.63	1.66											
25/09/2012	28	292.9	25	8210	328	32.2													
25/09/2012	28	293.8	25	7932	317	31.1	24.24	1.07	23.9	1.36	0.81	3.36	BUENO	0.4	EXCELENTE	1.6	0.8		
25/09/2012	28	293.1	25	8104	324	31.8													
24/09/2012	3	279.9	25	4610	184	18.1	30.58	1.82	30.9	1.52	0.90	2.91	MUY BUENO	0.4	EXCELENTE	1.5	1.6		
24/09/2012	3	284.7	25	4713	189	18.5													
24/09/2012	3	283.8	25	4562	182	17.9	16.26	1.56											
25/09/2012	3	289.8	25	4385	176	17.2													
25/09/2012	3	287.0	25	4042	162	15.9	23.63	1.66											
25/09/2012	3	285.9	25	3987	160	15.7													
24/09/2012	7	285.8	25	6254	250	24.5	24.24	1.07	23.9	1.36	0.81	3.36	BUENO	0.4	EXCELENTE	1.6	0.8		
24/09/2012	7	287.8	25	5832	233	22.9													
24/09/2012	7	286.0	25	5982	239	23.5	30.58	1.82											
25/09/2012	7	284.2	25	6359	254	24.9													
25/09/2012	7	284.3	25	6086	243	23.9	24.24	1.07	23.9	1.36	0.81	3.36	BUENO	0.4	EXCELENTE	1.6	0.8		
25/09/2012	7	282.9	25	6094	244	23.9													
24/09/2012	28	291.4	25	7500	300	29.4	30.58	1.82	30.9	1.52	0.90	2.91	MUY BUENO	0.4	EXCELENTE	1.5	1.6		
24/09/2012	28	290.4	25	7965	319	31.2													
24/09/2012	28	290.1	25	7919	317	31.1	31.14	1.22	30.9	1.52	0.90	2.91	MUY BUENO	0.4	EXCELENTE	1.5	1.6		
25/09/2012	28	287.5	25	7780	311	30.5													
25/09/2012	28	281.4	25	8081	324	31.7	31.14	1.22	30.9	1.52	0.90	2.91	MUY BUENO	0.4	EXCELENTE	1.5	1.6		
25/09/2012	28	287.3	25	7943	318	31.2													

Mezclas	Fecha de toma	Edad de Ensayo (días)	Peso (Kgf)	Área (cm ²)	Carga máx (Kgf)	Tensión (Kgf/cm ²)	Tensión (Mpa)	R _{ts} (Mpa)	R _i (Mpa)	R _{tm} (Mpa)	R (Mpa)	S _i (Mpa)	V _i	CONTROL	S _L (Mpa)	CONTROL	Verif Máx de Serie	Verif mín de Serie
M- VII (30% FCC)	24/09/2012	3	267,6	25	3310	132	13,0	13,4	0,66	13,6	0,78	0,46	3,39	EXCELENTE	0,4	EXCELENTE	0,8	1,0
	24/09/2012	3	267,4	25	3434	137	13,5											
	24/09/2012	3	265,1	25	3479	139	13,6	13,9	0,90	13,6	0,78	0,46	3,39	EXCELENTE	0,4	EXCELENTE	1,0	1,4
	25/09/2012	3	279,7	25	3635	145	14,3											
	25/09/2012	3	277,9	25	3582	143	14,1	13,4	0,90	13,6	0,78	0,46	3,39	EXCELENTE	0,4	EXCELENTE	1,0	1,4
	25/09/2012	3	271,9	25	3405	136	13,4											
	24/09/2012	7	270,6	25	4765	191	18,7	19,3	1,43	19,8	1,30	0,77	3,87	EXCELENTE	0,8	EXCELENTE	1,1	0,8
	24/09/2012	7	268,4	25	4859	194	19,1											
	24/09/2012	7	269,7	25	5130	205	20,1	20,4	1,17	19,8	1,30	0,77	3,87	EXCELENTE	0,8	EXCELENTE	1,0	0,5
	25/09/2012	7	271,6	25	5091	204	20,0											
	25/09/2012	7	278,9	25	5115	205	20,1	21,1	1,98	26,6	1,44	0,85	3,19	BUENO	0,6	EXCELENTE	1,8	1,2
	25/09/2012	7	278,9	25	5388	216	21,1											
	24/09/2012	28	268,4	25	6797	272	26,7	27,1	0,90	26,6	1,44	0,85	3,19	BUENO	0,6	EXCELENTE	0,9	0,5
	24/09/2012	28	263,2	25	6704	268	26,3											
	24/09/2012	28	264,4	25	7209	288	28,3	26,2	0,90	26,6	1,44	0,85	3,19	BUENO	0,6	EXCELENTE	0,9	0,5
	25/09/2012	28	275,0	25	6583	263	25,8											
	25/09/2012	28	284,4	25	6812	272	26,7	26,2	0,90	26,6	1,44	0,85	3,19	BUENO	0,6	EXCELENTE	0,9	0,5
	25/09/2012	28	286,2	25	6614	265	25,9											