

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

**OBTENCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO A PARTIR DEL
CATALIZADOR AGOTADO DE LA UNIDAD DE CRAQUEO
CATALÍTICO FLUIDIZADO DE LA REFINERÍA ESMERALDAS
COMO ADICIÓN PUZOLÁNICA.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

ALEX FREDERICK MOSQUERA CANCHINGRE

alex_fmc@hotmail.com

DIRECTOR: ING. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA, MBA

german.luna@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS, MSc.

lucia.montenegro@epn.edu.ec

Quito, marzo 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2016)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Alex Frederick Mosquera Canchingre, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Alex Frederick Mosquera Canchingre

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Alex Frederick Mosquera Canchingre, bajo nuestra supervisión.

Ing. Germán Luna Hermosa, MBA.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Lucía Montenegro Aguas, MSc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

DEDICATORIA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Catalizador de craqueo catalítico fluidizado	1
1.1.1 Unidad de craqueo catalítico fluidizado	1
1.1.2 Mecanismo de las reacciones de craqueo catalítico	4
1.1.2.1 Reacciones primarias	5
1.1.2.2 Reacciones secundarias	6
1.1.3 Evolución de los catalizadores de FCC	8
1.1.4 Componentes típicos de un catalizador FCC	9
1.1.4.1 Componente activo: zeolita	10
1.1.4.2 Matriz del catalizador FCC	11
1.1.4.3 Aditivos del catalizador FCC	12
1.1.5 Características físicas del catalizador FCC	13
1.1.5.1 Superficie específica (AE)	13
1.1.5.2 Estabilidad	13
1.1.5.3 Diámetro y volumen de los poros	14
1.1.5.4 Resistencia a la atrición	14
1.1.5.5 Tamaño de partícula	15
1.1.5.6 Densidad aparente	16
1.1.6 propiedades catalíticas del catalizador FCC	17
1.1.6.1 Actividad	17
1.1.6.2 Selectividad	17
1.1.7 Catalizadores agotados de FCC	18
1.2 Materiales puzolánicos	19
1.2.1 Origen de los materiales puzolánicos	19
1.2.2 Definición de puzolana	20
1.2.3 Clasificación de las puzolanas	20
1.2.4 Usos de las puzolanas	21
1.2.5 Ventajas del uso de puzolanas	22
1.2.6 Reacciones puzolánicas	24
1.2.6.1 Factores que afectan las reacciones puzolánicas	24
1.2.6.2 Mecanismo de las reacciones puzolánicas	25
1.2.7 Métodos para evaluar la actividad puzolánica	26
1.2.7.1 Propiedades físicas y químicas	26
1.2.7.2 Ensayo de Frattini	27
1.2.7.3 Análisis termogravimétrico	28
1.2.7.4 Análisis mineralógico	29
1.2.8 Ejemplos de materiales puzolánicos	30
1.2.8.1 Ceniza volante	30
1.2.8.2 Escoria de alto horno	30
1.2.8.3 Humo de sílice	31

2. PARTE EXPERIMENTAL	32
2.1 Caracterización física y mineralógica del catalizador agotado proveniente de la unidad de FCC de la Refinería Esmeraldas.	32
2.1.1 Caracterización física del catalizador FCC	32
2.1.1.1 Granulometría y finura del catalizador agotado	32
2.1.1.2 Densidad real del catalizador agotado	32
2.1.2 Caracterización mineralógica del catalizador FCC	32
2.2 Evaluación de la actividad puzolánica del catalizador agotado de la unidad de FCC y de las propiedades mecánicas del hormigón y mortero adicionados con el mismo	33
2.2.1 Caracterización de cemento	33
2.2.1.1 Densidad real del cemento	33
2.2.1.2 Densidad suelta y compactada del cemento	34
2.2.2 Caracterización de agregados fino y grueso	34
2.2.2.1 Granulometría del agregado grueso	34
2.2.2.2 Densidad suelta y compactada del agregado grueso	35
2.2.2.3 Densidad real y absorción del agregado grueso	35
2.2.2.4 Granulometría y módulo de finura del agregado fino	36
2.2.2.5 Densidad real y absorción del agregado fino	36
2.2.2.6 Contenido orgánico del agregado fino	37
2.2.2.7 Densidad suelta y compactada del agregado fino	38
2.2.3 Dosificación	38
2.2.3.1 Hormigón convencional	38
2.2.3.2 Hormigón con adición de catalizador agotado	39
2.2.4 Evaluación de propiedades mecánicas de hormigón y mortero	39
2.2.4.1 Evaluación de propiedades mecánicas en hormigón fresco	39
2.2.4.2 Evaluación de propiedades mecánicas en hormigón endurecido	41
2.2.4.3 Evaluación de propiedades mecánicas en mortero	43
2.3 Diseño de planta piloto para la producción de cemento portland puzolánico	45
2.4 Comparación económica de la producción de hormigón y mortero con catalizador agotado de la unidad de FCC con la producción de los mismos sin adición.	46
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
3.1 Resultados de la caracterización catalizador agotado	47
3.1.1 Caracterización física del catalizador agotado	47
3.1.1.1 Granulometría y finura del catalizador agotado	47
3.1.1.2 Densidad real del catalizador agotado	49
3.1.2 Caracterización mineralógica del catalizador agotado	50
3.1.2.1 Difracción de rayos X	50
3.1.2.2 Resultados del análisis químico semi-cuantitativo	51

3.2	Resultados caracterización cemento	52
3.2.1	Densidad real del cemento	52
3.2.2	Densidad suelta y compactada del cemento	52
3.3	Resultados caracterización de agregados	53
3.3.1	Caracterización agregado grueso	53
3.3.1.1	Granulometría del agregado grueso	53
3.3.1.2	Densidad real y absorción del agregado grueso	55
3.3.1.3	Densidad suelta y compactada del agregado grueso	55
3.3.2	Caracterización del agregado fino	56
3.3.2.1	Granulometría y módulo de finura del agregado fino	56
3.3.2.2	Densidad real y absorción del agregado fino	58
3.3.2.3	Densidad suelta y compactada del agregado fino	58
3.3.2.4	Contenido orgánico del agregado fino	59
3.4	Resultados de la dosificación	60
3.4.1	Hormigón convencional	60
3.4.2	Hormigón con adición de catalizador agotado	60
3.5	Resultados de las propiedades de hormigón y mortero	61
3.5.1	Resultados de ensayos en hormigón fresco	61
3.5.1.1	Tiempo inicial de fraguado	61
3.5.1.2	Contenido de aire	62
3.5.1.3	Calor de hidratación	63
3.5.1.4	Requerimiento de agua	65
3.5.2	Resultados de ensayos en hormigón endurecido	65
3.5.2.1	Resistencia a la compresión	65
3.5.2.2	Expansión y contracción en autoclave	67
3.5.2.3	Test de lixiviación TCLP	68
3.5.3	Resultados de ensayos en mortero	70
3.5.3.1	Contenido de aire en el mortero	70
3.5.3.2	Índice de actividad puzolánica	71
3.5.3.3	Expansión en mortero	73
3.5.3.4	Contracción por secado	73
3.5.3.5	Resistencia a los sulfatos	74
3.6	Diseño de la planta	75
3.6.1	Capacidad de la planta	75
3.6.2	Descripción del proceso de producción	77
3.6.3	Localización de la planta	77
3.6.4	Balance de masa	79
3.6.4.1	Molienda de clínker	79
3.6.4.2	Enfriamiento de clínker	81
3.6.4.3	Clinkerización	81
3.6.4.4	Pre calentamiento de materia prima	84
3.6.4.5	Molienda de materia prima	84
3.6.4.6	Trituración de caliza	84
3.6.5	Balance de energía	85
3.6.6	Diagrama de bloques del proceso	86
3.6.7	Diagrama P&ID del proceso	87

3.6.8	Diagrama PFD del proceso	88
3.6.9	Distribución de la planta	89
3.6.10	Dimensionamiento y selección de equipos	90
3.6.11	Requerimiento de servicios	95
3.7	Evaluación económica de la producción de hormigón y mortero con catalizador agotado de la unidad fcc	96
3.7.1	Análisis económico de la obtención de hormigón y mortero con adición de catalizador agotado	96
3.7.2	Análisis económico de la obtención de hormigón y mortero sin adición de catalizador agotado	101
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
4.1	Conclusiones	103
4.2	Recomendaciones	105
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
	ANEXOS	123

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 3.1.	Granulometría del catalizador agotado	47
Tabla 3.2.	Resultados de la densidad real del catalizador agotado	49
Tabla 3.3.	Rangos de densidad real de varios materiales puzolánicos	50
Tabla 3.4.	Compuestos del catalizador FCC detectados por difracción de rayos X	50
Tabla 3.5.	Composición elemental del catalizador FCC	51
Tabla 3.6.	Densidad real del cemento	52
Tabla 3.7.	Resultados de la densidad suelta y compactada del cemento	53
Tabla 3.8.	Granulometría del agregado grueso	53
Tabla 3.9.	Límites de la norma INEN 872 para agregado grueso de 1 pulgada de tamaño nominal	54
Tabla 3.10.	Resultados de la densidad real y absorción del agregado grueso	55
Tabla 3.11.	Resultados de la densidad suelta y compactada del agregado grueso	56
Tabla 3.12.	Granulometría del agregado fino	56
Tabla 3.13.	Límites de la norma 872 para agregado fino	57
Tabla 3.14.	Resultados de densidad real y absorción de agregado fino	58
Tabla 3.15.	Resultados de la densidad suelta y compactada de agregado fino	59
Tabla 3.16.	Dosificación en peso de 1 m ³ de hormigón convencional de resistencia a la compresión de 210 kg/cm ²	60
Tabla 3.17.	Dosificación en peso para 1 m ³ de hormigón con diferentes porcentajes de catalizador agotado	60
Tabla 3.18.	Tiempo de fraguado de cemento patrón y cemento con adición de catalizador agotado	61
Tabla 3.19.	Contenido de aire de hormigón convencional y hormigón con adición de catalizador agotado	63

Tabla 3.20.	Calor de hidratación de hormigón convencional y hormigón con adición de catalizador agotado	64
Tabla 3.21.	Resistencia a la compresión	66
Tabla 3.22.	Desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón con el tiempo	66
Tabla 3.23.	Desarrollo de la resistencia a la compresión de las muestras ensayadas	66
Tabla 3.24.	Resultados de expansión en autoclave	67
Tabla 3.25.	Resultados del test de lixiviación TCLP	69
Tabla 3.26.	Contenido de aire de mortero estándar y mortero con adición de catalizador agotado	70
Tabla 3.27.	Dosificación de morteros para determinación del índice de actividad puzolánica del catalizador agotado	71
Tabla 3.28.	Índice de actividad puzolánica	72
Tabla 3.29.	Expansión en mortero estándar y mortero con sustitución de catalizador agotado	73
Tabla 3.30.	Contracción por secado	74
Tabla 3.31.	Resistencia a los sulfatos	75
Tabla 3.32.	Composición del cemento portland puzolánico	76
Tabla 3.33.	Cantidad de agregados fino y grueso para producir hormigón de cemento portland puzolánico	76
Tabla 3.34.	Composición de clínker producido	82
Tabla 3.35.	Materia prima necesaria para la producción de clínker de cemento portland	83
Tabla 3.36.	Composición de gases de combustión a la salida del horno rotatorio	83
Tabla 3.37.	Balance de energía del proceso de producción de cemento portland puzolánico	85
Tabla 3.38.	Constantes para el diseño de tamices	90
Tabla 3.39.	Características de los tamices: S-101, S-201 y S-202	91
Tabla 3.40.	Características de la trituradora de mandíbulas	91

Tabla 3.41.	Características del precalentador	92
Tabla 3.42.	Características del horno rotatorio	92
Tabla 3.43.	Características del enfriador	93
Tabla 3.44.	Características de los molinos de bolas	95
Tabla 3.45.	Requerimiento de servicios industriales para el proceso de producción de cemento portland puzolánico	95
Tabla 3.46.	Costo de materia prima para primer año de funcionamiento de la planta de producción de cemento portland puzolánico	97
Tabla 3.47.	Costos de los equipos	97
Tabla 3.48.	Inversión total requerida para arrancar el proyecto	98
Tabla 3.49.	Costos variables	99
Tabla 3.50.	Costos fijos del proyecto	99
Tabla 3.51.	Costos fijos totales del proyecto	100
Tabla 3.52.	Depreciación de equipos y edificios	100
Tabla 3.53.	Ingresos por venta de producto	100
Tabla 3.54.	Indicadores económicos del proyecto	101
Tabla 3.55.	Costos de materia prima	102
Tabla 3.56.	Indicadores económicos del proyecto	102
Tabla AI.1.	Resultados de la densidad real del catalizador agotado	124
Tabla AI.2.	Requisitos físicos y químicos de las puzolanas naturales o calcinas de la norma INEN 1501	126
Tabla AII.1.	Resultados de la densidad real del cemento	127
Tabla AII.2.	Resultados de la densidad suelta y compactada del cemento	128
Tabla AII.3.	Datos del molde utilizado en los ensayos de densidad suelta y compactada del cemento	129
Tabla AII.4.	Resultados de los ensayos de densidad real y absorción del agregado grueso	130
Tabla AII.5.	Resultados de la densidad suelta y compactada del agregado grueso	130

Tabla AII.6.	Datos del molde utilizado en los ensayos de densidad suelta y compactada del agregado grueso	130
Tabla AII.7.	Resultados de los ensayos de densidad real y absorción del agregado fino	131
Tabla AII.8.	Resultados de la densidad suelta y compactada del agregado fino	132
Tabla AII.9.	Datos del molde utilizado en los ensayos de densidad suelta y compactada del agregado fino	133
Tabla AIII.1.	Propiedades físicas del cemento y de los agregados fino y grueso	134
Tabla AIII.2.	Asentamientos sugeridos para diversas construcciones	135
Tabla AIII.3.	Tamaño máximo de agregado grueso sugerido para diversas construcciones, en cm	135
Tabla AIII.4.	Cantidad de agua requerida con base en el asentamiento y tamaño de agregado grueso para hormigón sin incorporador de aire	136
Tabla AIII.5.	Relación agua-cemento con base en la resistencia a la compresión seleccionada	137
Tabla AIII.6.	Volumen aparente de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón	138
Tabla AIII. 7.	Dosificación de 1 m ³ de hormigón convencional de 210 kg/cm ² de resistencia a la compresión	139
Tabla AIV. 1.	Datos experimentales de tiempo de fraguado	140
Tabla AIV. 2.	Tiempo de fraguado de cemento patrón y cemento con adición de catalizador agotado	141
Tabla AIV.3.	Contenido de aire de hormigón convencional y hormigón con adición de catalizador agotado	142
Tabla AIV.4.	Datos experimentales de elevación de temperatura corregida	143
Tabla AIV.5.	Datos para determinar la capacidad térmica del calorímetro	143
Tabla AIV.6.	Datos experimentales del calor de hidratación del cemento patrón	146
Tabla AIV.7.	Datos experimentales del calor de hidratación del cemento con 5 % de adición de catalizador agotado	146

Tabla AIV.8.	Datos experimentales del calor de hidratación del cemento con 10 % de adición de catalizador agotado	147
Tabla AIV.9.	Datos experimentales del calor de hidratación del cemento con 15 % de adición de catalizador agotado	147
Tabla AIV.10.	Resistencia a la compresión de hormigón convencional	148
Tabla AV.1.	Composición de clínker	161
Tabla AV.2.	Método cualitativo para determinar la localización de la planta	168
Tabla AV.3.	Especificaciones de la trituradora	169
Tabla AV.4.	Especificaciones del molino de bolas	170
Tabla AV.5.	Especificaciones del precalentador	171
Tabla AV.6.	Especificaciones del horno rotatorio	172
Tabla AV.7.	Especificaciones del enfriador	173
Tabla AVI.1.	Flujo de fondos del proyecto	174

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Equipos principales de la unidad FCC	2
Figura 1.2.	Componentes de un catalizador FCC	9
Figura 1.3.	Configuración de la faujasita REY	10
Figura 1.4.	Distribución del tamaño de las partículas del catalizador FCC	16
Figura 1.5.	Ejemplo de los resultados obtenidos mediante un ensayo de Frattini	28
Figura 3.1.	Porcentaje retenido acumulado del catalizador vs abertura de la malla del tamiz (μm)	48
Figura 3.2.	Porcentaje pasado acumulado del catalizador agotado vs abertura de la malla del tamiz (μm)	48
Figura 3.3.	Porcentaje pasado acumulado de agregado grueso vs logaritmo de la abertura del tamiz (mm)	54
Figura 3.4.	Porcentaje pasado acumulado de agregado fino vs logaritmo de la abertura del tamiz (μm)	57
Figura 3.5.	Localización de la planta de producción de cemento portland puzolánico	79
Figura 3.6.	Balance de masa del proceso	80
Figura 3.7.	Diagrama de bloques del proceso	86
Figura 3.8.	Diagrama P&ID del proceso	87
Figura 3.9.	Diagrama de PFD del proceso	88
Figura 3.10.	Distribución de la planta de producción de cemento portland puzolánico y de hormigón elaborado de este material	89
Figura AI. 1.	Difractograma del catalizador agotado	125
Figura AII. 1.	Ensayo de densidad real del cemento	128
Figura AII. 2.	Ensayo de contenido orgánico del agregado fino	133

Figura AIV. 1. Aparato de Vicat utilizado en los ensayos de tiempo de fraguado	141
Figura AIV.2. Equipo utilizado para medir el contenido de aire en hormigón	142
Figura AIV.3. Equipo utilizado para la determinación del calor de hidratación	145
Figura AIV.4. Máquina utilizada para realizar los ensayos de resistencia a la compresión	150
Figura AIV.5. Autoclave utilizado en los ensayos de determinación de la expansión en autoclave de hormigón y mortero	152
Figura AIV.6. Ensayo de índice de actividad puzolánica	154
Figura AIV.7. Equipo utilizado para medir el contenido de aire en el mortero	156
Figura AIV.8. Moldes utilizados en los ensayos de expansión en autoclave, contracción por secado y resistencia a los sulfatos	158
Figura AIV.9. Moldes utilizados en los ensayos de expansión en autoclave, contracción por secado y resistencia a los sulfatos	158
Figura AIV.10. Ensayo de resistencia a los sulfatos	160
Figura AV.1. Secciones del horno rotario	161

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Caracterización física y mineralógica del catalizador FCC	124
ANEXO II Caracterización física de cemento y agregados fino y grueso	127
ANEXO III Procedimiento para calcular la dosificación de hormigón	134
ANEXO IV Resultados de los ensayos de evaluación de la actividad puzolánica del catalizador agotado de la unidad de FCC y de las propiedades mecánicas del hormigón y mortero adicionados con el mismo	140
ANEXO V Diseño de planta piloto para la producción de cemento portland puzolánico	161
ANEXO VI Evaluación económica de la producción de hormigón y mortero con catalizador agotado de la unidad FCC	174

RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo determinar si el catalizador agotado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC) de la Refinería Esmeraldas puede ser utilizado como adición puzolánica para hormigón y mortero. Para este fin, el catalizador agotado fue caracterizado física y mineralógicamente, se determinó que el tamaño de partícula del catalizador agotado fue de 106 μm , por lo que fue necesario pulverizarlo para alcanzar un tamaño de 45 μm requerido para sustituir parcialmente al cemento en las mezclas de hormigón y mortero. Su densidad fue de 2,57 g/cm^3 , lo cual coincidió con la de otros materiales puzolánicos como ceniza volante, humo de sílice y arcilla calcinada. De la caracterización mineralógica se observó que está conformado por una matriz de sílice y alúmina y que sus componentes mayoritarios son silicio y aluminio que constituyen 30,4 % y 29,7 % de su peso respectivamente. Al comparar la resistencia a la compresión de probetas de mortero con adición de catalizador y sin adición, se determinó que el índice de actividad puzolánica del catalizador agotado fue de 86,61 %.

Las propiedades mecánicas de hormigón y mortero fueron evaluadas en probetas en las que se sustituyó diferentes porcentajes de cemento por catalizador agotado: 5, 10, 15 y 20 %. Las propiedades evaluadas fueron: finura, expansión en autoclave, tiempo de fraguado, contenido de aire, resistencia a la compresión, calor de hidratación, requerimiento de agua, contracción por secado, expansión en mortero, resistencia a los sulfatos y concentración de metales mediante un test de lixiviación TCLP.

El porcentaje de sustitución óptimo fue de 10 % ya que con este porcentaje se cumplen los requisitos establecidos por la norma INEN 490 y se logra aprovechar mayor cantidad de material desechado. Aplicando este porcentaje se obtuvo mejoras en varias de las propiedades evaluadas. Las muestras de hormigón fresco disminuyeron su tiempo de fraguado en 14 %, el porcentaje de expansión en autoclave para hormigón y mortero se redujo en 0,15 % y 0,05 % respectivamente. El valor del contenido de aire atrapado en hormigón y mortero no superó el 1,5 % establecido en la dosificación.

La resistencia mecánica del hormigón elaborado con este porcentaje de adición de catalizador fue de 99,04 % con respecto al hormigón convencional. El calor de hidratación fue 21,5 % mayor que el de la muestra patrón y no cumplió con el requisito de la norma INEN 490. Las muestras adicionadas con material puzolánico mejoraron la contracción por secado en 14 % e incrementaron la resistencia a los sulfatos en 9,5 %, sin embargo, este aumento no fue suficiente para obtener cemento apto para trabajar bajo el ataque de estas sustancias. El test de lixiviación TCLP evidenció que el uso de catalizador agotado como material puzolánico no representa riesgo ambiental ya que las concentraciones de los metales contaminantes no superaron los límites permisibles.

Después de evaluar las propiedades mecánicas, se desarrolló la ingeniería básica de una planta piloto con capacidad para producir 300 sacos de 50 kg de cemento portland puzolánico por día, ya que se dispuso de 1 500 kg de catalizador que son desechados diariamente por la Refinería Esmeraldas. Para definir la capacidad de producción de la planta se consideró el mejor porcentaje de sustitución de cemento por catalizador agotado, adicionalmente, se determinó las cantidades de agregado fino y agregado grueso necesarias para producir hormigón con el tipo de cemento antes mencionado siguiendo la dosificación obtenida para alcanzar una resistencia de 210 kg/cm². En el diseño de la planta se incluyó la descripción del proceso, diagramas del proceso (BFD, PFD y P&ID), distribución en planta, balances de masa y energía, requerimiento de servicios, dimensionamiento y selección de equipos.

Finalmente, se realizó una comparación económica entre la producción de hormigón y mortero con adición de catalizador agotado y sin adición. Los indicadores económicos evaluados fueron el TIR y VAN, que fueron de 35 % y \$ 298 279,43 respectivamente para el caso en el que se utilizó adición puzolánica de catalizador agotado. Estos valores fueron mayores a los obtenidos para el caso en el que no se sustituye cemento por catalizador agotado que fueron 26 % \$ 119 023,37. Por lo tanto, se concluyó que el proceso de obtención de hormigón y mortero de cemento portland puzolánico a partir del catalizador agotado es más rentable que la producción de estos materiales sin la adición dicho catalizador.

INTRODUCCIÓN

En la unidad de FCC se lleva a cabo el rompimiento de las moléculas de hidrocarburos mediante la aplicación de altas temperaturas, baja presión y el uso de catalizador. En esta operación se realiza la conversión de cortes de crudo pesado en productos de mayor valor económico como naftas, gas licuado de petróleo o LPG y aceites cíclicos. El catalizador circula de forma continua en un reactor donde realiza el craqueo molecular, posteriormente ingresa a un regenerador donde se reactiva mediante combustión y finalmente vuelve al reactor. El catalizador de FCC está conformado en su mayoría por la zeolita Y, un aluminosilicato cristalino y poroso (MathPro, 2011, p. 25).

Estudios previos han demostrado que la composición del catalizador lo convierte en un material puzolánico muy activo, esto significa que tiene gran capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio del cemento en presencia de agua, lo que le permite formar compuestos hidráulicos como el hormigón o el mortero. Los materiales que poseen esta propiedad son conocidos como puzolanas (Torres, Izquierdo, Trochez y Mejía, 2012, pp. 7-8).

La utilización de materiales puzolánicos en la industria del cemento es bastante común, su potencial para reaccionar con la cal hidratada permite que las pastas de cemento mejoren sus propiedades. Se ha observado beneficios en propiedades como: la resistencia a la agresividad de ataques químicos, la resistencia a la compresión, además disminuyen la permeabilidad y el tiempo de fraguado. Las mejoras pueden ser significativas a corto o largo plazo lo cual hace que estos cementos compuestos puedan tener diversas aplicaciones (Borrachero et al., 2002, p. 579).

El uso de puzolanas no solo tiene ventajas en cuanto al rendimiento del hormigón y del mortero, también representa un beneficio ambiental puesto que al disminuir el consumo de cemento o clínker se puede disminuir su producción, la cual libera gases contaminantes a la atmósfera. Al utilizar catalizador agotado de FCC como aditivo puzolánico se tiene un doble impacto ambiental, ya que además de

disminuir la producción de clínker, se crea la posibilidad de darle una disposición final segura a un residuo industrial (Torres y Torres, 2010, p. 35).

El catalizador puede entrar en un proceso de regeneración un número limitado de veces, después queda desactivado y se convierte en un residuo peligroso. Esto genera un pasivo ambiental que actualmente no recibe un tratamiento apropiado en la Refinería Esmeraldas, ya que es almacenado en sacos de yute a la intemperie en zonas que no son adecuadas para depositar residuos de ésta naturaleza. La cantidad de catalizador de FCC agotado que se desecha es de 1 500 kg por día (Cervantes, 2009, p. 52).

En la Refinería Esmeraldas se caracteriza el catalizador FCC constantemente con la finalidad de adquirir información útil sobre su rendimiento dentro del proceso. El catalizador es analizado por la empresa Grace Catalysts Technologies con sede en Maryland, Estados Unidos, la misma que desarrolla y proporciona el catalizador de FCC fresco que se alimenta a la planta (Grace Catalysts Technologies, 2014, p. 2).

Los análisis realizados por la compañía Grace Catalysts Technologies muestran que el catalizador agotado de FCC contiene metales como: Ni, V, Na, Al, Ca, Fe, K, Mg, Pb y Ti, lo cual convierte a este material en un residuo peligroso que requiere de tratamiento previo a su disposición final. Adicionalmente, más de 70 % de su estructura está constituida por una matriz de zeolita, por lo que se considera como un material apto para ser aplicado como puzolana de cemento (Torres et al., 2012, p. 9).

El propósito de este trabajo es dar tratamiento a 1 500 kg de catalizador FCC que son desechados diariamente por la Refinería Esmeraldas, que por su contenido de metales y su inadecuada disposición final representan un problema ambiental que afecta a los habitantes de la ciudad. Para dar solución a este problema se aplicará este residuo como aditivo puzolánico para la obtención de hormigón y mortero, lo cual permitirá reducir el impacto ambiental que genera la actividad de la institución.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO

Los catalizadores tienen varias aplicaciones en la industria química: síntesis de compuestos químicos, petroquímica, industria farmacéutica, recuperación de metales y refinación de petróleo especialmente en hidrodesulfuración (HDS), craqueo catalítico fluidizado (FCC), hidrotratamiento y reformado catalítico continuo (CCR). La vida útil de un catalizador es corta y su regeneración tan solo se puede aplicar un número limitado de veces. Es por esto que cada año se generan grandes cantidades de catalizadores agotados que son considerados residuos altamente tóxicos debido a su gran contenido de metales pesados (Fornalczyk, 2012, pp. 864 - 865).

1.1.1 UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO

En la unidad de FCC, se lleva a cabo un proceso considerado como el más importante dentro de una refinería debido a que convierte cortes pesados de crudo en otros livianos que son de mayor valor económico. Este proceso tiene como objetivo principal modificar la estructura molecular de ciertos hidrocarburos mediante la aplicación de temperaturas altas, bajas presiones y el uso de un catalizador. Como productos se obtiene: gas combustible, GLP, naftas, coque y fracciones no convertidas como aceite ligero (LCO), aceite pesado (HCO) y *slurry*. (Torres y Torres, 2010, p. 36).

El catalizador FCC es un sólido complejo y es considerado como un componente fundamental dentro del mismo, ya que gracias a sus propiedades catalíticas y características ácidas se producen las rupturas de las moléculas de hidrocarburos aumentando los rendimientos en la obtención de los productos deseados. Los equipos principales que tiene una unidad FCC se presentan en la Figura 1.1. Estos son: reactor *riser* donde se llevará a cabo el proceso de rompimiento

molecular de los hidrocarburos y un regenerador, en el cual se tratará al catalizador contaminado (MathPro, 2011, p. 25).

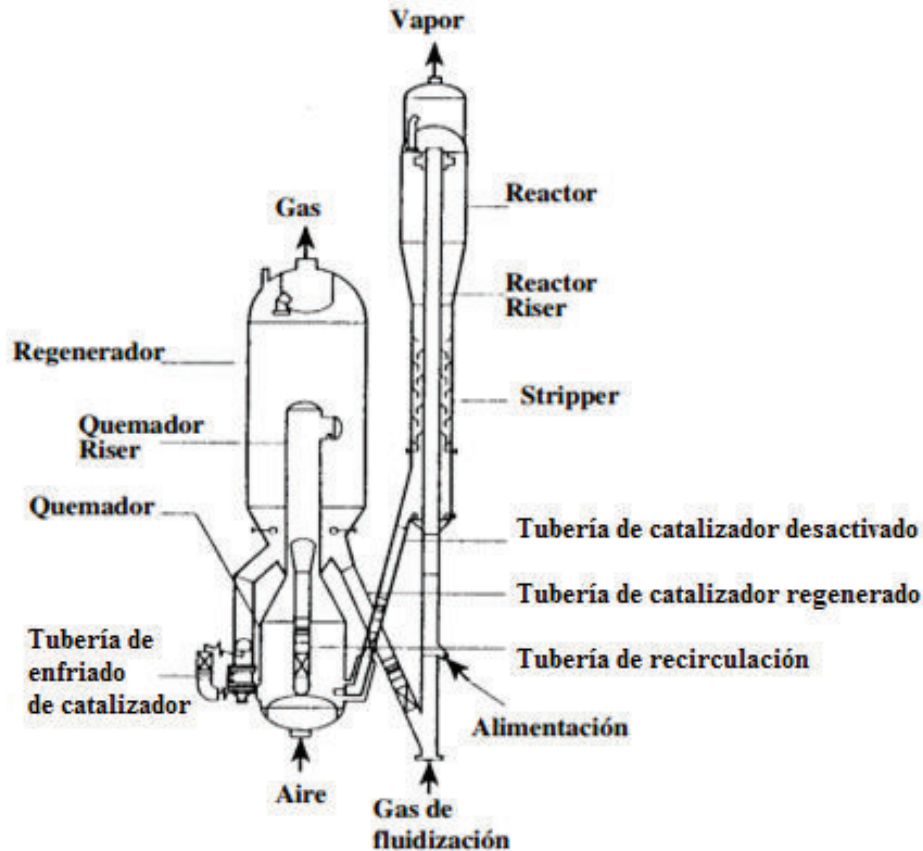


Figura 1.1. Equipos principales de la unidad FCC
(Passamonti, 2008, p. 8)

La alimentación al reactor, que se denomina gasóleo, previamente es calentada en intercambiadores de calor antes de ser inyectada en el reactor. La temperatura de precalentamiento del gasóleo está en el rango de 260 a 370 °C. Se introduce vapor en el reactor para facilitar la dispersión de la alimentación. La relación en peso de gasóleo-catalizador que ingresa al reactor es de 1:4 a 1:9. El área del reactor en la que se originan las reacciones de craqueo que ocurren al poner en contacto el catalizador con el gasóleo, se denomina *riser*. Este proceso dura de 1 a 3 segundos y la temperatura de operación es de 510 a 540 °C. Las reacciones de craqueo catalítico son endotérmicas y obtienen la energía necesaria del catalizador circulante. El calor que el catalizador absorbe durante su regeneración

proporciona la energía que la alimentación requiere para llegar hasta la temperatura de operación del reactor (Sadeghbeigi, 2000, pp. 7-8).

Según Magee y Dolbear (2010), concluidas las reacciones de craqueo, el catalizador disminuye su actividad debido a que en su superficie se ha depositado coque (0,4 – 2,5 % en peso), compuesto por hidrógeno, carbono, nitrógeno y azufre. A este catalizador se lo denomina desactivado y se lo separa de los gases del craqueo (productos) en ciclones cerrados que se encuentran en la parte superior del reactor (p. 65).

El catalizador desactivado es enviado al regenerador, cuyas funciones principales son: restablecer la actividad del catalizador quemando el coque mediante la inyección de aire comprimido y proveer la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de craqueo catalítico. La temperatura en la que opera el regenerador puede variar de 650 a 790 ° C. Las reacciones que se producen en el regenerador se ilustran desde la ecuación [1.1] hasta la [1.6] (Sadeghbeigi, 2000, p. 14).



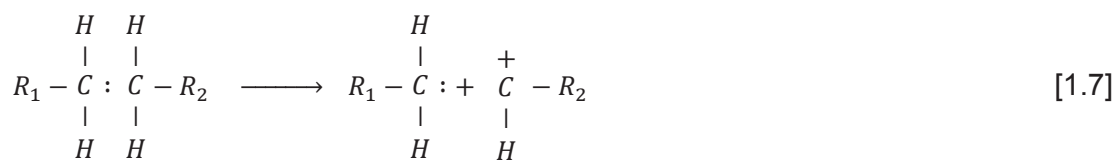
Una vez restablecida la actividad del catalizador, éste se denomina catalizador regenerado y se recircula continuamente entre el reactor y regenerador aprovechando así las características del sistema. Los gases de combustión

provenientes de la quema del coque pasan a través de ciclones de doble etapa, donde las partículas de catalizador que fueron arrastradas por los gases se recuperan y se devuelven al reactor para empezar el proceso nuevamente, mientras que, con el objetivo de recuperar vapor, los gases se envían a la atmósfera mediante el uso de condensadores. El catalizador fresco es adicionado periódicamente al proceso para compensar las pérdidas de catalizador durante la regeneración (Passamonti, 2008, pp. 7-9).

Los gases de craqueo, después de separarse del catalizador desactivado, se dirigen a una torre de destilación conocida como fraccionadora principal, obteniéndose una separación primaria de los productos: slurry se queda en el fondo de la torre, aceite pesado (HCO) y aceite ligero (LCO) como extracciones laterales, nafta, LPG y gas combustible en el tope de la torre. Finalmente la fracción liviana es procesada en depropanizadores y debutanizadoras, obteniendo gasolinas y diésel (Sadeghbeige, 2000, pp. 22-39; Hudec, 2011, pp. 1-8).

1.1.2 MECANISMO DE LAS REACCIONES DE CRAQUEO CATALÍTICO

El craqueo catalítico ocurre a través del mecanismo de los iones carbonio (cambio iónico), donde un par de electrones compartido de la estructura se queda con uno de los átomos de carbono quedando el otro átomo de carbono con carga positiva (ion carbonio), tal como se ilustra en la ecuación [1.7] (O'Connor, 2007, p. 227).



Las reacciones de formación de iones carbonio son muy importantes ya que a través de ellas ocurren alteraciones químicas que producen los compuestos deseados. Las reacciones catalíticas se dividen en dos clases: en las primarias ocurre el craqueo inicial de las moléculas de hidrocarburos y en las secundarias se dan re-arreglos de las moléculas craqueadas (O'Connor, 2007, p. 227).

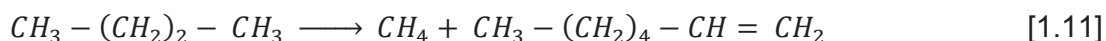
1.1.2.1 Reacciones primarias

Las reacciones primarias son aquellas en las que se efectúa el craqueo inicial, son endotérmicas, de alta velocidad y están favorecidas por la elevada temperatura del catalizador. Las reacciones primarias se llevan a cabo en el orden que se muestra en las ecuaciones [1.8] a [1.10].

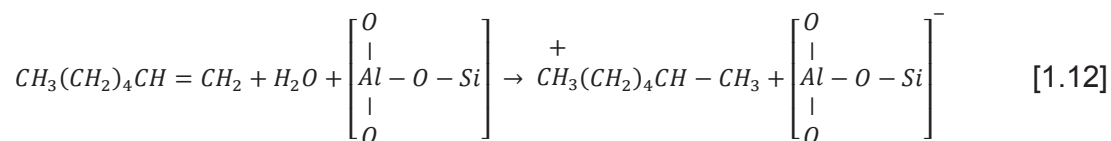


Al primer contacto de la carga (gasóleo) con el catalizador en el *riser*, ocurre la vaporización de la misma y durante algunos segundos se da el craqueo térmico que forma las primeras olefinas que generan los iones carbonio. Las olefinas añaden un protón del catalizador (sitio ácido Bronsted) formando iones carbonio grandes, los mismos que se descomponen de acuerdo con la regla beta (β): ruptura de un ion carbonio grande en el carbono localizado en la posición β , en relación al carbono donde está la carga positiva. Esto se realiza con el fin de formar iones carbonio pequeños y olefinas. Los iones carbonio pequeños transfieren un ion hidrógeno (sitio ácido Lewis) de la n-parafina formando moléculas pequeñas de parafina y un nuevo ion carbonio grande. Este proceso se ilustra en las ecuaciones [1.11] a [1.15] tomando como ejemplo al n-octano. Las parafinas durante el craqueo generan propileno, butanos, butilenos y producen nafta en el rango de C5 a C6 con alto octanaje. El craqueo de olefinas genera otras olefinas de menor peso molecular y su velocidad de reacción es mayor comparada con las parafinas debido a la facilidad que éstas poseen para formar iones carbonio (Behera, Ray y Singh, 2007, pp. 163-164)

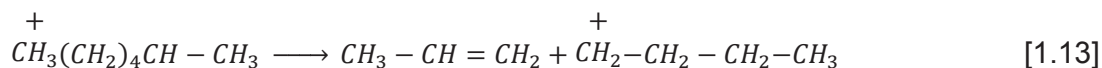
- Reacción de inicio del craqueo térmico



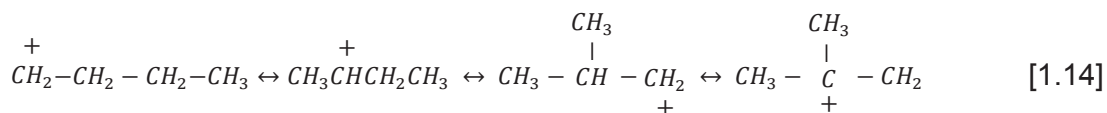
- Transferencia de un protón del catalizador



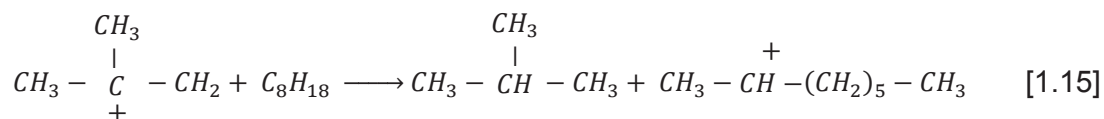
- División beta (β)



- Rearreglo del ion carbonio a una estructura más estable



- Transferencia del ión hidrógeno



El craqueo de nafténicos también produce olefinas y su velocidad de reacción es mayor que la velocidad de las parafinas debido al número más elevado de carbonos secundarios. El craqueo de ramificaciones de aromáticos genera olefinas y parafinas (Bhattacharyya, 2010, p. 16).

1.1.2.2 Reacciones secundarias

Las reacciones secundarias ocurren después del craqueo y son muy importantes ya que serán las que determinen la composición final de los productos. Son

exotérmicas y se ven favorecidas por la pérdida de temperatura del catalizador a lo largo del reactor, por lo tanto tienen menor velocidad que las reacciones primarias. Las reacciones secundarias son:

- Isomerización
- Ciclización
- Transferencia de hidrógeno
- Condensación

La isomerización ocurre normalmente con las olefinas casi sin que se lleven a cabo reacciones con las parafinas. Son reacciones poco exotérmicas y aunque tengan velocidad menor que las reacciones primarias, todavía son rápidas y ocurren en la superficie del catalizador. La isomerización se caracteriza por el re-arreglo estructural debido al cambio de posición de un grupo metilo (CH_3) en la estructura (Behera, Ray y Singh, 2007, pp. 166).

La ciclización no es una reacción frecuente en el craqueo pero puede ocurrir con las olefinas, contribuye a la formación de anillos nafténicos de 5 y 6 átomos de carbono, siendo que el anillo hexagonal puede transformarse en aromático por la reacción de transferencia de hidrógeno (Corma y Sauvanaud, 2007, p. 41).

La reacción de transferencia de hidrógeno ocurre en los hidrocarburos cicloparafínicos o nafténicos transformándolos en aromáticos. Es una reacción más lenta que las reacciones primarias, reduce la cantidad de olefinas en los productos, disminuyendo los riesgos de formación de goma en la nafta; tiene una influencia específica en el peso molecular de los productos, formando compuestos de mayor peso molecular debido a la conversión de olefinas en parafinas; contribuye a la formación de coque (Bhattacharyya, 2010, p. 16).

La calidad del gasóleo influye en todo el mecanismo de reacción del craqueo catalítico, siendo la condensación la más afectada si se tiene una gran cantidad de precursores de coque: aromáticos, asfaltenos, resinas, etc. Las reacciones de

condensación predominan en el final del reactor y, como son exotérmicas, están favorecidas por la pérdida de temperatura en el catalizador (Hudec, 2011, p. 9).

1.1.3 EVOLUCIÓN DE LOS CATALIZADORES DE FCC

A medida que se progresaba en el diseño y mejora de las unidades FCC, también se iban desarrollando catalizadores FCC activos y estables, con las propiedades adecuadas para alcanzar rendimientos altos en la obtención de los productos deseados. El primer catalizador que se desarrolló fue de cloruro de aluminio, debido a que se conocía que utilizar un catalizador ácido era necesario para craquear los enlaces carbono-carbono. Sin embargo este catalizador ácido no resultó útil para las reacciones de craqueo porque presentaba problemas en cuanto a su manipulación, tratamiento de residuos y corrosión (Hudec, 2011, p. 7).

En 1911 se conoció que las arcillas tenían acción catalítica al entrar en contacto con hidrocarburos pesados, es decir éstas promovían la formación de estructuras moleculares más livianas. En la superficie de la arcilla se depositaban cadenas poliméricas con un contenido alto de carbono (coque), provocando una disminución en su actividad catalítica. En los años posteriores las investigaciones se enfocaron en desarrollar un catalizador que produjera menos coque, se eliminaron determinados componentes en las arcillas mediante tratamientos ácidos, mejorando su acción catalítica y consecuentemente, incrementando los rendimientos de productos más nobles como la nafta y el GLP (Passamonti, 2008, p. 10).

En 1945 aparecieron los catalizadores sintéticos, constituidos principalmente de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), eran sólidos amorfos y microesféricos, y de 2 a 3 veces más activos dejando obsoletos los catalizadores de arcillas. La hegemonía del catalizador sintético predominó hasta 1962, cuando apareció un nuevo catalizador que tenía como componente principal la zeolita, un aluminosilicato cristalino. Colocar las zeolitas en la estructura de los catalizadores hizo que los sitios ácidos de Lewis se vuelvan fácilmente accesibles, logrando incrementos

valiosos en la calidad y producción de la nafta, disminución de la producción de coque y aumento de la resistencia a los contaminantes presentes en el gasóleo (Gary y Handwerk, 2007, p. 107).

Se concluyó que los catalizadores zeolíticos poseían las propiedades requeridas de un catalizador eficiente: área superficial adecuada para tener una actividad catalítica 100 % eficiente, selectividad, estabilidad, correcto tamaño de poro y un costo bajo, es por esto que todavía están en uso hoy en día (Salbilla, Kolmetz, Sim y Soyza, 2002, pp. 3-5).

1.1.4 COMPONENTES TÍPICOS DE UN CATALIZADOR FCC

En las unidades de FCC, los catalizadores típicos utilizados son sólidos particulados con un tamaño que varía de 75 a 100 μm . La Figura 1.2 muestra una composición porcentual hipotética de cada componente de un catalizador de craqueo catalítico fluidizado.

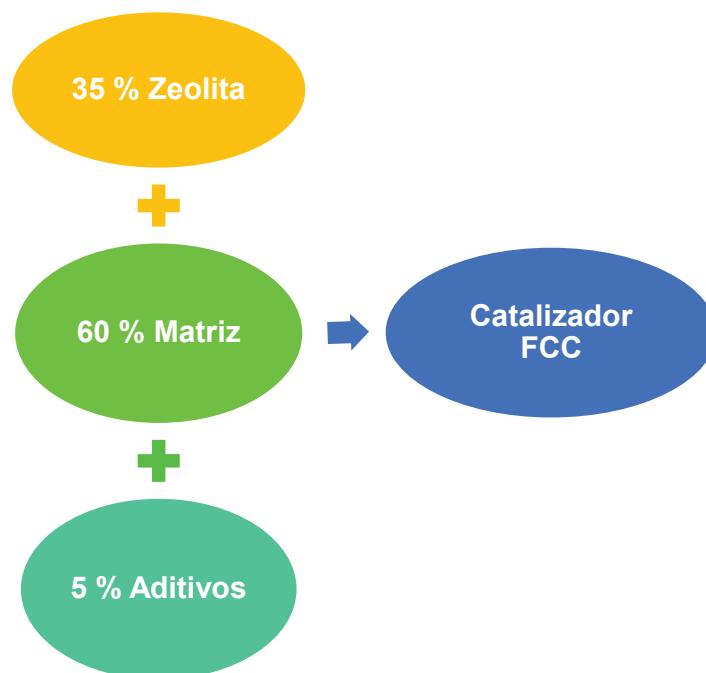


Figura 1.2. Componentes de un catalizador FCC
(Sadeghbeige, 2000, p. 85)

1.1.4.1 Componente activo: zeolita

El componente activo que se encarga de formar la red cristalina del catalizador es la zeolita, normalmente constituye de 10 a 50 % de su peso y se encuentra dispersa en la matriz, su contenido ajusta la actividad y selectividad del catalizador. Las zeolitas están formadas por una secuencia de tetraedros en cuyo centro puede estar un átomo de silicio (Si) o un anión de aluminio (Al^-). Se caracterizan por formar configuraciones tridimensionales que se encuentran a distancias regulares produciendo una sucesión de poros que se comunican entre ellos. La estructura básica del arreglo tridimensional se denomina sodalita y está constituida por 8 ciclos hexagonales de 6 tetraedros y 6 ciclos formados por 4 tetraedros. Según las unidades de sodalitas que se ligen, se puede tener varios tipos de zeolitas (Gary y Handwerk, 2007, p. 108).

La faujasita tipo Y es la única zeolita, de los varios tipos que se conocen en la naturaleza, que tiene aplicación en el proceso de craqueo catalítico. Sin embargo esta faujasita posee baja actividad por lo que durante la formulación del catalizador, se le somete a un cambio iónico en medio ácido (H_3O^+) y de sales de tierras raras, logrando con esto sustituir los cationes de sodio (Na^+) utilizados para neutralizar los aniones de aluminio, aumentando la actividad. Las tierras raras que se usan son lantano y cerio, por lo tanto a esta zeolita sintética se le denomina faujasita REY y se la presenta en la Figura 1.3 (Dupain, Krul y Makkee, 2005, pp. 289-290).

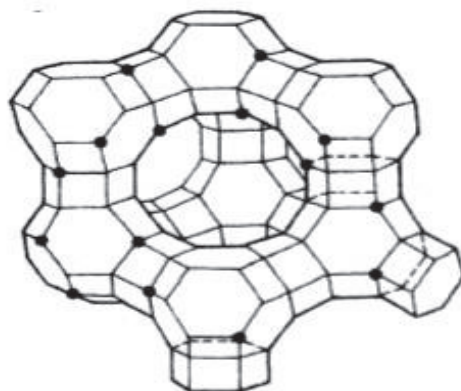


Figura 1.3. Configuración de la faujasita REY
(Passamonti, 2008, p. 21)

1.1.4.2 Matriz del catalizador FCC

Por lo general, la matriz se compone de sustancias que se utilizaron como catalizadores de FCC antes del desarrollo de los catalizadores que contienen zeolitas (faujasita), por ejemplo, arcillas y geles sintéticos de aluminosilicatos. La faujasita y los aditivos se encuentran soportados en la matriz. El catalizador FCC tiene tres tipos de matrices: activa, inerte y sintética (Bhattacharyya, 2010, p. 9).

La matriz activa tiene un porcentaje en peso de alrededor del 20 % dentro del catalizador y su principal constituyente es la alúmina. La mayoría de matrices activas usadas en los catalizadores FCC son amorfas, además poseen una estructura porosa que permite la dispersión de los hidrocarburos a través del catalizador. La matriz activa es utilizada cuando hay interés en un pre-craqueo de las moléculas grandes. Los sitios ácidos que posee la faujasita son más selectivos que los sitios localizados en la matriz activa, sin embargo estos tienen la habilidad de craquear las moléculas más pesadas de hidrocarburos que no pueden ingresar en los poros pequeños de la faujasita (Sadeghbeigi, 2000, pp. 93-95).

Esta matriz también incrementa la actividad global del catalizador porque posee actividad para el craqueo, aumenta el octanaje de la nafta debido al incremento en la conversión y en el mayor contenido de olefinas. Su estructura porosa estable (mesoporos) previene la sinterización de las partículas del catalizador cuando está expuesto a condiciones hidrotérmicas adversas durante el proceso de craqueo catalítico. Actúa como una trampa porque captura metales que contaminan el catalizador como níquel, vanadio y nitrógeno básico. Una de las desventajas de la matriz activa es que sus impurezas cubren a la faujasita y la desactivan prematuramente (Bhattacharyya, 2010, pp. 9-10).

La matriz inerte puede estar compuesta por una arcilla natural o modificada químicamente, como caolinita, hallosita o montmorillonita. Esta matriz constituye 25 % del peso del catalizador y le proporciona estabilidad mecánica y una fluidización más eficiente, además sirve como soporte para la faujasita y los aditivos. La matriz inerte minimiza la producción de finos del catalizador durante el

proceso de craqueo catalítico, ayudando a controlar las pérdidas de catalizador (Woltermann, Magee y Griffith, 2003, p. 125).

La función principal de la matriz sintética es mantener unidas la faujasita y las matrices activa e inerte; representa 15 % del peso del catalizador y no posee acción catalítica, actuando apenas como elemento aglutinador y su componente principal es sílica. Dependiendo de la cantidad, puede restringir el acceso a los microporos o dejar el catalizador más frágil. La matriz sintética proporciona las propiedades físicas al catalizador como: densidad, resistencia a la atrición, tamaño de partícula, etc (Lloyd, 2011, p. 191).

1.1.4.3 Aditivos del catalizador FCC

Los aditivos son añadidos al catalizador de FCC para aumentar los rendimientos en el proceso y cumplir con las regulaciones ambientales que cada vez son más estrictas. Los aditivos más usados son: promotores de combustión de monóxido de carbono (CO), aditivos de sulfuros (SO_x) y pasivadores de metales. Los promotores de CO se usan para ayudar en la combustión de CO a CO₂ en el regenerador, aceleran la combustión de CO en la fase densa evitando que se alcancen altas temperaturas. Los ingredientes activos de un promotor son los metales del grupo del platino (Gläser y Weitkamp, 2004, p. 168).

El coque que se deposita en el catalizador agotado contiene azufre, y cuando ingresa al regenerador se convierte en SO₂ y SO₃. La mezcla de SO₂ y SO₃ es comúnmente conocida como SO_x, este gas es descargado a la atmósfera provocando una gran contaminación ambiental. Los aditivos de SO_x son usados para disminuir dicha contaminación, usualmente se utilizan óxidos metálicos que se añaden directamente al catalizador y se encargan de adsorber y enlazarse químicamente con el SO₃, este gas se arrastra al reactor donde es reducido o regenerado. Los materiales más comunes y eficientes para elaborar estos aditivos son óxidos de vanadio, cerio, magnesio y aluminio (Boskovic y Baerns, 2004, p. 490).

Los pasivadores de metales se usan para neutralizar los metales contaminantes: níquel, sodio y vanadio que están presentes en el gasóleo. Estos metales se depositan en la superficie del catalizador envenenando los sitios activos, disminuyendo la actividad catalítica del mismo y provocando un aumento en la producción de coque y gas combustible. Los pasivadores más usados son antimonio y bismuto, éstos crean aleaciones con níquel que disminuyen las reacciones de deshidrogenación en un 40 y 60 % (Boskovic y Baerns, 2004, p. 493).

1.1.5 CARÁCTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CATALIZADOR FCC

1.1.5.1 Superficie específica (AE)

La superficie específica del catalizador proviene de la faujasita y de la matriz, la unidad de medida es m^2/g y depende de la cantidad de alúmina en la matriz activa y de la cantidad de faujasita. Si estas cantidades se incrementan, aumentará el valor de la superficie y a su vez la actividad catalítica del catalizador. Un catalizador de FCC tiene una superficie específica que varía de 200 a 300 m^2/g . Su reducción se produce debido a: tratamiento hidrotérmico dado a la faujasita para mejorar su estabilidad afectando a su cristalinidad y provocando un cambio en su estructura porosa; durante la etapa de stripping, antes de la regeneración, la estructura de los poros podría colapsar y por la contaminación del catalizador con vanadio y nitrógeno básico produciendo una sinterización de la matriz y neutralización de los sitios ácidos (Moore, Mitchell y Hoffman, 2003, p. 307).

1.1.5.2 Estabilidad

Esta propiedad le permite al catalizador conservar la actividad y selectividad a lo largo del tiempo. Es influenciada por la composición que tiene el catalizador: relación molar silicio y aluminio (SAR). Cuanto más alto es el SAR mayor es la estabilidad, que aumenta también con el incremento en el contenido de tierras

raras. El SAR mínimo que debe tener un catalizador con una buena estabilidad térmica es de 4. Los factores del proceso de craqueo catalítico que afectan la estabilidad son: las temperaturas altas que se generan en el regenerador provocando una desactivación hidrotérmica y la contaminación del catalizador con vanadato de sodio líquido (formado en el regenerador) que se encarga de destruir las zeolitas (Bhattacharyya, 2010, pp. 11-12).

1.1.5.3 Diámetro y volumen de los poros

Una de las propiedades que más influye en las características catalíticas de la faujasita es el diámetro de los poros, si éstos son demasiado pequeños tienen mayor tendencia a obstruirse y también exhiben una mayor resistencia difusional, por otra parte, si son muy grandes proporcionan una superficie específica baja para un volumen dado y por lo tanto reducen la eficacia del catalizador y conducen a un mayor desgaste de éste. La forma de los poros es la propiedad más importante que rige la selectividad del catalizador, pues dentro de estos se producen las reacciones de craqueo catalítico de hidrocarburos y las transformaciones puzolánicas que ocurren cuando el catalizador es utilizado como aditivo de cemento (Borrachero et al., 2014, pp. 60-65).

El diámetro de los poros depende de la porosidad de los componentes del catalizador, la unidad de medida es el angstrom (Å). El volumen de los poros es una medida indirecta del área específica, siendo más una medida de actividad del catalizador. Está influenciado por los componentes del catalizador durante su formulación y su unidad de medida es cm^3/g (Moore, Mitchell y Hoffman, 2003, p. 307).

1.1.5.4 Resistencia a la atrición

La resistencia al desgaste o a la atrición del catalizador se conoce por el valor del índice de atrición (IA) que se obtiene de métodos estándar. Es una medida de la

dureza, un catalizador perfecto tiene un IA que varía de 3 a 7. Un incremento en el contenido de faujasita en el catalizador, la reducción en el tamaño de sus cristales y una buena dispersión dentro de la matriz, conducen a tener una mejor resistencia a la atrición. La naturaleza y cantidad de matriz inerte y sintética que contiene el catalizador también afectan esta propiedad (Passamonti, 2008, pp. 133-135).

Durante la operación de la unidad de FCC, las altas velocidades de flujo de los gases y las temperaturas severas, causan el desgaste de las partículas del catalizador y aumentan la producción de finos. En los ciclones que posee el reactor, no se logran recuperar todos los finos antes que se separen de los productos. Esto provoca grandes pérdidas del catalizador y contaminación en el medio ambiente por la emisión de material particulado. Al salir del proceso de craqueo, el catalizador agotado presenta una resistencia a la atrición menor que la del catalizador fresco, por lo que se facilita su reducción de tamaño en procesos de molienda (Passamonti, 2008, pp. 133-135).

1.1.5.5 Tamaño de partícula

El catalizador de FCC es un polvo fino que adquiere propiedades de un fluido cuando es aireado. La fluidización se obtiene cuando un fluido accionador pasa a través del lecho particulado con velocidad suficiente para mantener partículas en suspensión, en un movimiento en forma de torbellino, semejante a un líquido en ebullición. La distribución del tamaño de partícula es un indicador importante de las características de fluidización y resistencia a la atrición del catalizador y del desempeño de los ciclones. Cantidades altas de partículas con un tamaño mayor a 80 μm pueden acarrear una distribución desigual del fluido accionador, perjudicando la quema de coque debido a la mala difusión de aire y dificultando la fluidización. Cantidades altas de finos con un tamaño menor a 20 μm dificultan el desempeño de los ciclones incrementando la pérdida del catalizador. La distribución del tamaño de partículas del catalizador FCC se expone en la Figura 1.4 (Sadeghbeige, 2000, p. 100).

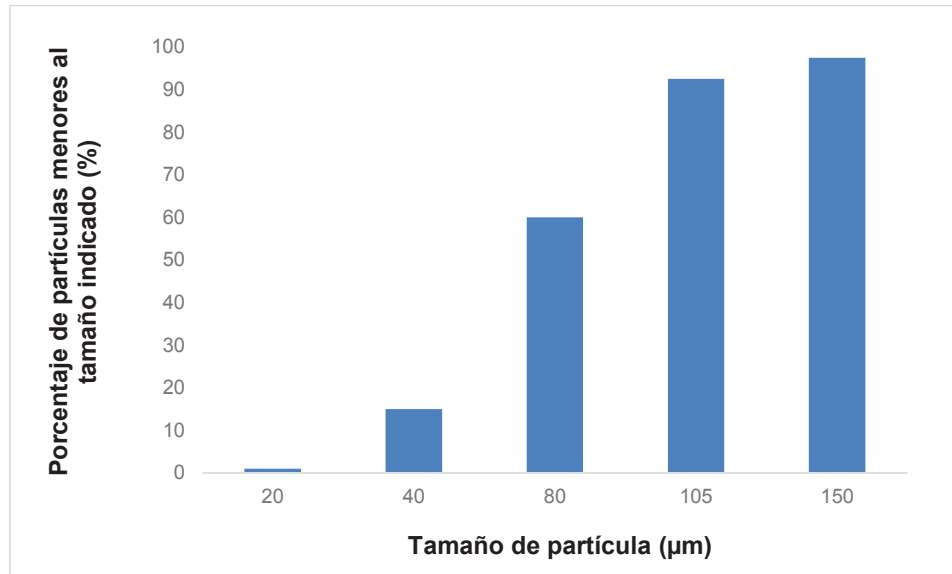


Figura 1.4. Distribución del tamaño de las partículas del catalizador FCC
(Bhattacharyya, 2010, pp. 11-12)

1.1.5.6 Densidad aparente

Esta propiedad se relaciona directamente con la circulación y fluidización del catalizador en el reactor y regenerador. Un valor alto en la densidad aparente del catalizador ocasionará una mala fluidización, mientras que un valor bajo provocará una excesiva pérdida de catalizador. La densidad aparente de un catalizador ideal está en el rango de 0,90 a 1,05 g/cm³ (Passamonti, 2008, pp. 145-146).

La densidad aparente del catalizador agotado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado presenta valores menores que los del cemento, los cuales varían de 0,96 a 1,28 g/cm³ para la condición de densidad en estado suelto y de 1,20 a 1,40 g/cm³ en estado compactado. Al incorporar materiales de baja densidad en la preparación de hormigón de cemento se puede disminuir la densidad del mismo, lo cual presenta ventajas como la reducción de costos de transporte, reducción del peso de estructuras sin afectar la resistencia mecánica, mejora en propiedades de aislamiento acústico y disminución de la conductividad térmica, siendo ésta última útil en construcciones rurales ya que otorga propiedades

aislantes a los elementos fabricados con este material (Valdez, Suárez, y Proaño, 2012, p. 2).

1.1.6 PROPIEDADES CATALÍTICAS DEL CATALIZADOR FCC

1.1.6.1 Actividad

Esta propiedad se encarga de medir la habilidad que tiene el catalizador FCC para realizar el craqueo de hidrocarburos, en ella influyen la superficie específica de la faujasita, la razón molar de silicio y aluminio (SAR), la cantidad de alúmina en la matriz y la acidez. Esta propiedad está caracterizada por la relación que existe entre los rendimientos de los productos y la cantidad utilizada de catalizador. La actividad catalítica es medida en el laboratorio a través de la prueba denominada MAT (Microactivity Test) que se expresa en unidades de microactividad, un catalizador eficiente debe estar en un rango de 55 a 75 unidades de microactividad (Sadeghbeige, 2000, p. 104).

La actividad es influenciada principalmente por el envenenamiento del catalizador con vanadio, sodio y nitrógeno básico. Estos elementos en presencia de vapor de agua y aliados a la temperatura del regenerador, destruyen la cristalinidad de la faujasita, neutralizan los sitios ácidos y producen la sinterización del catalizador, por lo que la pérdida de actividad es permanente (Hutchings y Védrine, 2004, pp. 230-235)

1.1.6.2 Selectividad

La característica que le permite al catalizador FCC alcanzar un alto rendimiento de producción de nafta se conoce como selectividad. Esta propiedad depende ampliamente de las características que posee la faujasita presente en el catalizador y es afectada por la contaminación causada por metales pesados que se encuentran en el gasóleo como: cobre, vanadio, níquel y hierro. Durante el

craqueo catalítico, dichos metales se impregnan en la superficie del catalizador, obstruyendo el paso de las cadenas largas de hidrocarburos hacia los sitios activos (Sadeghbeige, 2000, p. 105).

Para evitar la contaminación del catalizador FCC se añade a su formulación aditivos conocidos como pasivadores ambientales, los más comunes incluyen antimonio entre sus ingredientes funcionales. La selectividad se obtiene mediante una prueba de laboratorio, en la que se mide la relación del rendimiento de los productos deseados respecto al rendimiento de coque y gas metano. Si en esta prueba se obtiene valores mayores a 0,5 se considera que el catalizador ha sido contaminado (Sadeghbeige, 2000, p. 105).

1.1.7 CATALIZADORES AGOTADOS DE FCC

Un catalizador de FCC se considera como agotado cuando ha perdido sus propiedades catalíticas: selectividad y actividad. Esto se produce principalmente por el envenenamiento causado por los metales pesados (Ni, V, Fe y Na) presentes en el gasóleo cuando se llevan a cabo las reacciones de craqueo catalítico. Estos metales neutralizan los sitios ácidos, destruyen la zeolita, disminuyen el rendimiento de nafta y aumentan la producción de coque (Moore, Mitchell y Hoffman, 2003, p. 315).

En la actualidad, los catalizadores agotados son tratados industrialmente por medio de diferentes métodos. La regeneración aumenta el ciclo de vida del material y permite su reutilización. El reciclaje del catalizador permite la recuperación de metales valiosos que son de interés para diferentes aplicaciones. La recuperación de metales valiosos, aunque proporciona ventajas económicas, implica el uso de ácidos a gran escala para llevar a cabo los procesos, lo cual genera grandes volúmenes de residuos y emisiones gaseosas potencialmente peligrosas para el ambiente. Por otra parte, este sólido es en ocasiones depositado en rellenos sanitarios sin ningún tratamiento previo (Khang y Mosby, 2006, pp. 437-442).

Durante la regeneración el coque presente en el catalizador se combustiona con el fin de reestablecer su actividad, sin embargo, esta propiedad catalítica es limitada por lo que en un período corto de tiempo éste material se desactiva y es necesario reemplazarlo por uno fresco. El depósito en rellenos sanitarios no es recomendable tanto por el reducido espacio disponible en los vertederos y por los problemas de contaminación que estos desechos peligrosos pueden ocasionar. Por lo tanto, el alto costo y el impacto ambiental negativo de los métodos convencionales, justifican el predominante uso de catalizadores FCC agotados en el área de materiales de construcción: producción de cemento puzolánico (Khang y Mosby, 2006, pp. 437-442).

1.2 MATERIALES PUZOLÁNICOS

1.2.1 ORIGEN DE LOS MATERIALES PUZOLÁNICOS

El término puzolana se deriva del nombre del pueblo de Pozzuoli, Italia. Está situado en las cercanías del Monte Vesubio y es el lugar de donde los romanos, más de 2 000 años atrás, extraían la ceniza depositada por las erupciones ocasionales del volcán. Al mezclar estas cenizas con masilla de cal previamente curada por períodos de más de dos años en una proporción de 2:1, fueron capaces de construir las estructuras que la humanidad aún admira hoy en día (Brunjes, 2014, pp. 2-5).

Dado su origen natural, algunos científicos solo consideran como puzolana a la ceniza volcánica, piedra pómez, toba volcánica, etc. La mayoría de las veces el origen es irrelevante debido a que las cenizas de origen orgánico, como las cenizas de combustible pulverizadas y cenizas de cascarilla de arroz, también han demostrado que poseen propiedades beneficiosas cuando son mezcladas con cemento o cal, por lo tanto, lo que realmente interesa en estos materiales son las propiedades, principalmente el tamaño de partícula y la pureza, y los resultados de su actividad (Brunjes, 2014, pp. 2-5).

1.2.2 DEFINICIÓN DE PUZOLANA

Una puzolana o material puzolánico es un compuesto silíceo o sílico-aluminoso que individualmente presenta un valor cementante mínimo o nulo, es decir, que no tiene la capacidad de aumentar su resistencia por endurecimiento hidráulico, pero al ser finamente molido y al encontrarse en la presencia de humedad a temperaturas ordinarias, reacciona con cal hidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ para la creación de compuestos de baja solubilidad en agua y que poseen propiedades cementantes (Wilson y Ding, 2007, pp. 4-7).

El término “puzolana” engloba a materiales que son muy diferentes en su forma de ser originados y estructurados, y que difieren mucho en su composición química y mineralógica. Lo único en lo que estos materiales son similares es en su afinidad por la cal que les brinda la propiedad que se conoce como actividad puzolánica (Otsuki, 2010, p. 5).

1.2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PUZOLANAS

Para catalogar a las puzolanas existen varios sistemas que se basan en distintos criterios. Por ejemplo, uno de los sistemas de clasificación se basa en la composición química y mineralógica del material. Otro método sugiere una organización con base en la reactividad del material. Debido a que el término puzolana abarca un rango extremadamente amplio de materiales es difícil establecer un sistema de agrupación preciso, ya que estos difieren mucho en su composición química, naturaleza mineralógica y origen geológico. El método de clasificación más común es el que divide a las puzolanas en dos categorías dependiendo de su procedencia: naturales o artificiales (Day, 2011, p. 26).

Las puzolanas naturales son materiales naturales o calcinados como la ceniza volcánica, las tobas, rocas de ópalo, algunas arcillas y tierras diatomeas. La cantidad de material amorfo determina la reactividad de las puzolanas naturales que se dividen en tres subcategorías. La primera subdivisión está constituida por

la ceniza volcánica, en la cual el componente amorfo es vidrio producido por el rápido enfriamiento del magma. Esta ceniza es llamada toba cuando se endurece. En la segunda subcategoría se encuentran las tierras diatomeas y los materiales derivados de suelos o rocas, en los que el componente silíceo es principalmente ópalo. La tercera subdivisión está conformada por las arcillas y esquistos (Hoffman, 2013, p. 1).

La mayoría de las puzolanas artificiales utilizadas hoy en día son subproductos de procesos industriales. El humo de sílice se forma al reducir cuarzo de alta pureza en hornos de arco eléctricos utilizando carbón durante la producción de aleaciones de ferrosilicio y silicio. La ceniza de cascarilla de arroz produce ceniza con alto contenido de silicio cuando es calcinada. La ceniza volante es un subproducto de quemar carbón finamente molido para aplicaciones industriales o para la generación de electricidad (Hoffman, 2013, p. 2).

1.2.4 USOS DE LAS PUZOLANAS

El uso de puzolanas con cal para aplicaciones de albañilería data desde tiempos prehistóricos. Las puzolanas de origen natural han sido utilizadas en hormigón masivo en varios proyectos alrededor del mundo, y en lugares en los que está disponible localmente son utilizadas en construcciones de hormigón y en la fabricación de productos de hormigón. Estos usos de las puzolanas de origen natural se han extendido más en Europa que en Estados Unidos. Las puzolanas naturales ahora se utilizan en el hormigón de varias formas dependiendo de su grado de reactividad. Pueden ser utilizadas como adición de cemento portland o para sustituir parcialmente al mismo (Al-Chaar et al., 2011, p. 1).

Se han realizado varios estudios sobre el uso de puzolanas naturales con el propósito de controlar el calor de hidratación del hormigón para aplicaciones de hormigón masivo como en el caso de construcción represas. Existen cementos portland puzolánicos que sido diseñados para ser utilizados en varias estructuras para puentes por su bajo calor de hidratación y su comprobada resistencia a la

acción de soluciones de sulfatos. En la actualidad, los cementos compuestos, que están constituidos por cemento portland y puzolanas, son utilizados en las construcciones de hormigón por razones económicas, para disminuir el consumo energético y obtener beneficios técnicos específicos (Girard, 2011, p. 2).

1.2.5 VENTAJAS DEL USO DE PUZOLANAS

La incorporación de materiales puzolánicos o adiciones minerales en el hormigón de cemento portland presenta varias ventajas debido a su influencia en propiedades como el tiempo de fraguado, el calor de hidratación, el contenido de aire, la resistencia mecánica, la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia a los sulfatos. Su naturaleza puzolánica o cementante agrega un componente al reemplazar parte del cemento portland en el hormigón, lo cual reduce el costo en general. Al disminuir la cantidad de cemento portland utilizada mediante la adición de minerales se puede reducir el consumo de energía y disminuir la cantidad de gas carbónico emitida ya que también disminuye la cantidad de cemento producido en las plantas industriales. La norma INEN 2380, regula la fabricación del cemento por desempeño antes que por la formulación química que rige para el cemento portland puro bajo INEN 152. La norma INEN 1501 regula el uso de puzolanas junto con cemento portland (Hoffman, 2013, p. 9; INEN, 2012a, p. 3).

Las propiedades químicas y físicas de los diferentes materiales puzolánicos determinan qué propiedades del hormigón serán mejoradas con la inclusión de las mismas. El tamaño de partícula muy pequeño de varias de las adiciones puzolánicas puede ser de gran utilidad cuando la mezcla es deficiente en agregado fino. La puzolana actúa como un relleno y forma parte de la pasta de cemento, reduciendo el área superficial total que debe ser cubierta por material cementante. La adición de partículas esféricas finamente divididas (1-20 μm) también puede refinar la estructura de los poros del hormigón, lo cual disminuye el volumen de agua que se necesita para manufacturar hormigón de una consistencia establecida. Por otro lado, la forma de los microporos de algunas

puzolanas naturales puede incrementar la demanda de agua en las mezclas de hormigón (King, 2013, p. 69).

El uso de materiales puzolánicos con bajo contenido de carbono puede reducir la cantidad de agua requerida para preparar una mezcla de hormigón de cemento portland sin afectar las propiedades que tendría una estructura sin la adición de puzolana. Sin embargo, un material puzolánico con alto contenido de carbono puede aumentar demanda de agua de una mezcla de hormigón y afectar negativamente las propiedades de la misma, en este caso, se debe reducir el carbono presente en el material antes de ser incluido entre los componentes del hormigón. Al trabajar con hormigones en los que se requiere la incorporación de aire, el carbono desactiva los surfactantes destinados para este fin y los vuelve menos efectivos como agentes estabilizadores de burbujas de aire. El contenido de carbono de un material puzolánico se mide indirectamente mediante la determinación del porcentaje de pérdidas por calcinación, el cual no debe ser superior a 10 % para la que puzolana sea apta para ser utilizada como adición de hormigón de acuerdo con la norma INEN 494 (Thomas, 2014, pp. 4-5).

La trabajabilidad, que es la homogeneidad y facilidad con que el hormigón puede ser transportado, moldeado, compactado, y acabado, puede ser mejorada por la adición de puzolanas cuyas partículas esféricas actúan como rodamientos y a su vez disminuyen la necesidad de incluir agregado fino. La resistencia y la durabilidad del hormigón son aumentadas por la naturaleza fina de las adiciones minerales ya que ésta disminuye la porosidad del hormigón. La resistencia mecánica incrementa con el tiempo y eventualmente iguala y puede exceder la resistencia del hormigón creado sin la adición de materiales puzolánicos. La formación de compuestos cementantes por las reacciones puzolánicas causa refinación de los poros y reduce el agrietamiento en la zona de transición entre el hormigón y el agregado (Lohtia, y Joshi, 2005, pp. 657- 660).

Al reemplazar una fracción de cemento portland por materiales puzolánicos se retrasa la velocidad de reacción y se reduce un porcentaje de la liberación de calor durante la hidratación del cemento que es una reacción exotérmica, en

general, el porcentaje de reducción es la mitad del porcentaje de sustitución de puzolana por cemento portland. Por otro lado, existen puzolanas que son altamente reactivas y aceleran el incremento de temperatura en las primeras 72 horas. La reducción del calor de hidratación es importante especialmente en estructuras de gran tamaño donde el incremento de temperatura es más significativo ya que el estrés térmico puede provocar agrietamientos (Malhotra y Mehta, 2006, p. 191).

Las reacciones puzolánicas de las adiciones minerales ayudan a disminuir la permeabilidad del hormigón de cemento portland, la cual puede definirse como la resistencia que su estructura ofrece a la penetración de líquidos y gases ajenos a su composición. El hormigón contiene poros que permiten el paso de fluidos, la incorporación de materiales puzolánicos en la estructura del hormigón reduce el tamaño de los poros, lo cual conlleva a la reducción de la permeabilidad. Esto hace que sea más difícil que materiales nocivos penetren en su estructura y aumenta la durabilidad, que es la habilidad de resistir cualquier proceso de deterioro (Naik, Singh, y Hossain, 2013, pp. 1-2).

1.2.6 REACCIONES PUZOLÁNICAS

1.2.6.1 Factores que afectan las reacciones puzolánicas

El porcentaje de cal que se combina con los materiales puzolánicos se encuentra dentro de límites muy amplios y depende de factores relacionados con la naturaleza de la puzolana y con las características de la mezcla de hormigón de cemento portland. La naturaleza de la puzolana incluye la composición química y mineralógica, así como la superficie específica del material puzolánico; mientras que las propiedades de la mezcla de hormigón incluyen la temperatura de curado, la relación agua-cemento y la relación puzolana-cemento, éstas últimas determinan la temperatura y la velocidad a la que ocurren las reacciones puzolánicas (Bensted y Barnes, 2008, pp. 331-334).

Los factores principales que afectan a las reacciones puzolánicas son:

- Naturaleza y composición de las fases activas
- Contenido de fases activas dentro de la puzolana
- Superficie específica de las fases activas
- Relación cal/puzolana dentro de la mezcla
- Relación agua/cementante
- Tiempo de curado
- Temperatura de curado

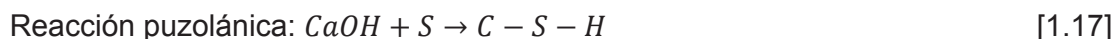
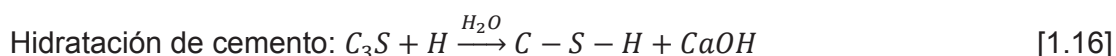
La cantidad de cal combinada depende principalmente del contenido de sílice o, teniendo en cuenta que la sílice también puede estar presente en formas no reactivas, del contenido de sílice activa del material puzolánico. Además, debido a que la alúmina de las fases activas también reacciona con la cal, se obtienen buenos resultados cuando al combinar cal con sílice activa y alúmina. Se ha demostrado que materiales cristalinos finamente molidos pueden absorber cantidades significativas de cal. Esta propiedad es bastante común entre varios silicatos. Una elevada superficie específica facilita la combinación de puzolana con cal, sin embargo, esta propiedad afecta la actividad puzolánica solo a cortas edades de curado. Para edades de curado más largas las reacciones puzolánicas son controladas por otros factores como el contenido de sílice y alúmina activa. La temperatura también contribuye a la velocidad con la que se combina la cal, pero si ésta es superior a 75 °C puede afectar de forma negativa la resistencia mecánica de la mezcla hormigón a largo plazo (Walker y Pavía, 2015, pp. 1-3).

1.2.6.2 Mecanismo de las reacciones puzolánicas

El mecanismo de las reacciones puzolánicas es complejo y no ha sido descifrado en su totalidad, no obstante, el análisis de los resultados obtenidos por varios estudios realizados hasta la actualidad sugiere el siguiente modelo simplificado. El fraguado o endurecimiento del cemento portland ocurre debido a la reacción de hidratación entre el agua y los compuestos cementantes la cual da origen a

silicatos de calcio hidratados (C-S-H), aluminatos de calcio hidratados (C-A-H) y $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Estos hidratos generalmente se conocen con el nombre de “gel de tobermorita”, por tener composición y propiedades de cohesión similares a las del mineral natural del mismo nombre. Las propiedades adhesivas y cohesivas de este gel aglutinan las partículas de los agregados (Rodríguez, Juárez y Uribe, 2010, p. 5).

Al incorporar una puzolana en el hormigón, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ liberado cuando el cemento portland se hidrata reacciona lentamente con los alumino-silicatos amorfos, que son los compuestos puzolánicos presentes en los minerales. Los productos de estas reacciones dependen del tiempo de curado pero básicamente son de la misma naturaleza y características que los productos de la hidratación del cemento. Por lo tanto, se dispone de compuestos cementantes adicionales que proporcionan mayor resistencia a la mezcla de hormigón. Las ecuaciones [1.16] y [1.17] ilustran de manera general las reacciones puzolánicas que producen un aglutinante adicional de silicato de calcio hidratado (Siddique y Khan, 2011, pp. 8-9).



1.2.7 MÉTODOS PARA EVALUAR LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA

1.2.7.1 Propiedades físicas y químicas

La norma INEN 1501 “Hormigón de cemento portland. Ceniza volante o puzolana natural para su uso en el hormigón de cemento portland. Muestro y ensayos.” presenta las especificaciones y requerimientos físicos y químicos de la ceniza volante y puzolanas naturales para ser utilizadas como materiales cementantes suplementarios. Estos requisitos se describen en el Anexo I. En esta norma

también se incluye el procedimiento estándar para calcular el índice de actividad puzolánica descrito por la norma INEN 496. De acuerdo con la norma INEN 1501 los criterios más importantes para determinar la actividad puzolánica son la suma de los componentes químicos, es decir, la suma de las cantidades de óxido de aluminio, óxido férrico y dióxido de silicio; y el índice de actividad de la resistencia definido como la relación entre el esfuerzo de compresión de un mortero con adición puzolánica y el esfuerzo compresión de un mortero de control sin adición (INEN, 2008, pp. 1-4; INEN, 2012b, pp. 1-2).

1.2.7.2 Ensayo de Frattini

En este método se preparan muestras constituidas por cemento y puzolana y se las mezcla con agua destilada. Después de la preparación las muestras son almacenadas por 8 días en botellas de plástico selladas dentro en un horno a 40 °C. El número de días de almacenamiento dentro del horno puede cambiar dependiendo del material puzolánico a ensayar debido a que algunas puzolanas tardan más que otras en reaccionar con hidróxido de calcio y demostrar su actividad puzolánica. Las puzolanas naturales usualmente no reaccionan con hidróxido de calcio hasta después de 30 días, por lo que es necesario almacenarlas durante este tiempo para estudiar su actividad puzolánica. Después del almacenamiento, las muestras son filtradas al vacío en papel filtro de tamaño nominal de 2,7 μm y enfriadas hasta la temperatura ambiente en un embudo Buchner sellado. Se analiza los grupos hidroxilo $[\text{OH}^-]$ presentes en el filtrado mediante titulación con ácido clorhídrico diluido (HCl) e indicador de anaranjado de metilo. Se ajusta el pH hasta 12,5 y se analiza la cantidad de iones calcio $[\text{Ca}^{2+}]$ mediante titulación con una solución de 0,03 mol/L de ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y utilizando reactivo de Patton y Reeder como indicador (Burgos, Cardona y Delvasto, 2014, pp. 10-11).

Los resultados se presentan en una gráfica que muestra la concentración de iones $[\text{Ca}^{2+}]$ expresado como equivalente de óxido de calcio en mmol/L versus la concentración de iones $[\text{OH}^-]$ en mmol/L. En la Figura 1.5 se puede observar un

ejemplo de los resultados que se obtienen en un ensayo de Frattini. Se obtiene una curva que define las áreas puzolánica y no puzolánica del material analizado. Los resultados que se encuentran debajo de la curva indican la remoción de iones $[Ca^{2+}]$ de la solución, lo cual es atribuido a la actividad puzolánica. Los resultados que se encuentran sobre la línea indican una actividad puzolánica igual a cero y los resultados que se encuentran por encima de la línea corresponden a la zona no puzolánica. En este procedimiento se asume que no existe otra fuente de calcio soluble presente en el sistema ya que la lixiviación de calcio puede invalidar los resultados (Burgos et al., 2014, pp. 10-11).

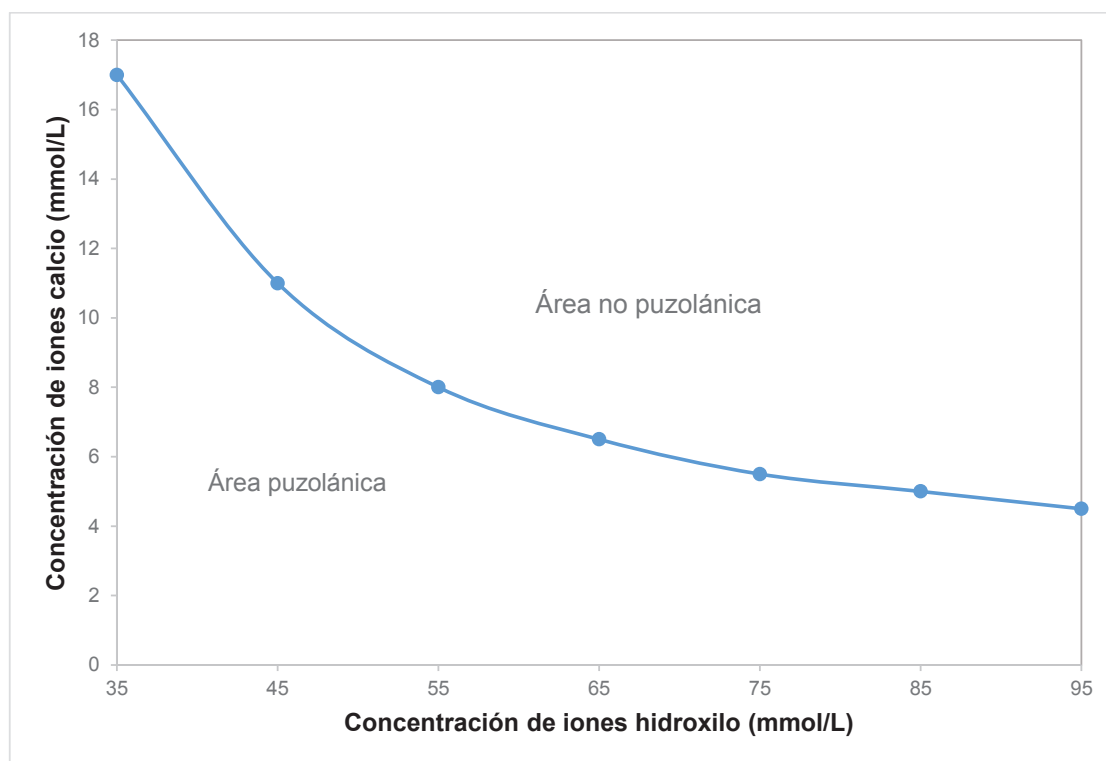


Figura 1.5. Ejemplo de los resultados obtenidos mediante un ensayo de Frattini (Burgos et al., 2014, pp. 10-11)

1.2.7.3 Análisis termogravimétrico

El método para evaluar la actividad puzolánica mediante análisis termogravimétrico se basa en la descomposición de hidróxido de calcio cristalino

que ocurre alrededor de 400 y 500 °C. Dentro de este rango de temperatura, el hidróxido de calcio se descompone en óxido de calcio y agua, la cual se evapora cuando se alcanza las temperaturas mencionadas. La disminución de peso, que resulta de la evaporación de agua durante el ensayo, es muy baja para puzolanas con alto índice de actividad y muy alta para puzolanas con bajo índice de actividad (Roszczyński, 2002, p. 387).

El análisis termogravimétrico se encuentra entre los métodos más exactos para la determinación de la actividad puzolánica de un mineral, adicionalmente, permite predecir las propiedades de la mezcla de cemento cuando se haya endurecido. A través de este método, se puede conocer el contenido de hidróxido de calcio en una pasta de cemento. Su reducción refleja con gran exactitud la acción puzolánica del mineral como una función de la cantidad de adición y del tiempo transcurrido desde el inicio de la hidratación (Roszczyński, 2002, p. 387).

1.2.7.4 Análisis mineralógico

Los compuestos minerales que forman parte de la estructura de una puzolana pueden ser identificados por difracción de rayos X, el cual es un método semi-cuantitativo. La cantidad de óxido de silicio no cristalino o amorfo, que juega un papel muy importante en la actividad puzolánica, puede determinarse mediante la identificación de compuestos que si son cristalinos (Najimi et al., 2010, 451-452).

Los resultados de una difracción de rayos X pueden relacionarse con una determinación de residuos insolubles, ya que el resultado de este último ensayo indica la cantidad de minerales solubles e insolubles detectados mediante difracción de rayos X. Otro método que puede ser utilizado para la determinación de minerales cristalinos y no cristalinos de una puzolana es el análisis en el microscopio petrográfico (Najimi et al., 2010, 451-452).

1.2.8 EJEMPLOS DE MATERIALES PUZOLÁNICOS

1.2.8.1 Ceniza volante

Es el material puzolánico utilizado más ampliamente en el hormigón, es un producto secundario que se obtiene al combustionar carbón pulverizado en las industrias generadoras de electricidad. La materia orgánica presente en el carbón se quema casi en su totalidad tras la ignición en el horno. La arcilla, esquistos, cuarzo y feldespato, que son las impurezas del carbón, se funden en una solución durante la combustión, la cual junto con los gases de escape deja la cámara de ignición. La temperatura de esta solución disminuye hasta que ésta se solidifica, formando partículas vítreas en forma de esferas conocidas como ceniza volante, las mismas que mediante precipitación electrostática se recuperan de los gases de combustión (Yazici, 2010, pp. 57-58).

La ceniza volante es un polvo finamente dividido que se asemeja al cemento portland, está principalmente constituida por calcio, alúmina, sílice y hierro además posee carbono, sodio, azufre, magnesio y potasio en cantidades pequeñas. El tamaño de partícula varía desde valores menores a 1 μm hasta valores mayores a 100 μm , siendo su valor más común de aproximadamente 20 μm . El área superficial varía en el rango de 300 a 500 m^2/kg , aunque puede ser tan baja como 200 m^2/kg y tan alta como 700 m^2/kg . Para cenizas volantes sin una estrecha compactación, la densidad aparente puede variar de 540 a 860 kg/m^3 , mientras que con el almacenamiento o la vibración, el rango puede ser 1 120 a 1 500 kg/m^3 . La densidad relativa generalmente oscila entre 1,9 y 2,8 (Yazici, 2010, pp. 57-58).

1.2.8.2 Escoria de alto horno

Este material es no metálico, hidráulico y está constituido mayormente por aluminosilicatos y silicatos de calcio, desarrollado al fundirse en un alto horno conjuntamente con hierro. La escoria que se funde a una temperatura de

aproximadamente 1 500 °C, posteriormente es enfriada en agua para formar un material granulado vítreo. El material granulado, que se reduce hasta alcanzar 45 μm , tiene una área superficial de aproximadamente 400 a 600 m^2/kg . La densidad relativa está en el rango de 2.85 a 2.95. La densidad aparente varía desde 1 050 hasta 1 375 kg/m^3 . Comúnmente constituye entre el 30 y el 45 % del material de cementación en la mezcla para producir hormigón, aunque hay algunos que poseen alrededor del 70 % (Gibbons, 2012, pp. 1-2).

1.2.8.3 Humo de sílice

Este material que también se conoce como microsílíce se forma al reducir cuarzo de alta pureza en hornos de arco eléctricos utilizando carbón durante la producción de aleaciones de ferrosilicio y silicio. Está compuesto esencialmente por dióxido de silicio (por lo general más del 85 %) en forma no cristalina, tiene forma esférica, es extremadamente fino con partículas de menos de 1 μm de diámetro y con un valor medio de alrededor de 0,1 μm ; aproximadamente 100 veces más pequeño que las partículas promedio de cemento (Yazici, 2010, p. 59).

Este material se eleva como un vapor oxidado de los hornos a 2 000 °C. Al enfriarse, condensa y se recoge en grandes bolsas de tela. Tiene un área superficial de aproximadamente 20 000 m^2/kg . La densidad relativa generalmente está en el rango de 2,2 a 2,5. La densidad aparente varía de 130 a 430 kg/m^3 . El humo de sílice se vende en forma de polvo, pero es más comúnmente disponible en líquido. Se utiliza en cantidades entre 5 y 10 % en peso del material cementicio. Se utiliza en aplicaciones en las que se necesita un alto grado de impermeabilidad y en hormigón de alta resistencia (Sánchez y Frías, 2010, p. 3).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MINERALÓGICA DEL CATALIZADOR AGOTADO PROVENIENTE DE LA UNIDAD DE FCC DE LA REFINERÍA ESMERALDAS.

2.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL CATALIZADOR FCC

2.1.1.1 Granulometría y finura del catalizador agotado

Para cada ensayo de caracterización del catalizador agotado de FCC se realizó 3 repeticiones. El análisis granulométrico fue realizado siguiendo el procedimiento señalado en la norma INEN 696 “Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso”. Una muestra de 300 g de catalizador agotado fue separada mecánicamente en una torre de tamices Tyler ajustados a un vibrotamizador ATM ARROW durante 15 minutos. Se realizó los cálculos necesarios para graficar las curvas granulométricas y determinar el d_{80} . El cumplimiento de la finura fue verificado haciendo pasar el material por un tamiz de malla No. 325 (45 μm) (INEN, 2011a, p. 3).

2.1.1.2 Densidad real del catalizador agotado

Este análisis se realizó siguiendo la norma ASTM C 188 “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement” descrita en la sección 2.2.1.1.

2.1.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL CATALIZADOR FCC

Este análisis consistió en un ensayo de difracción de rayos X con el que se determinó los minerales presentes en el catalizador agotado, y un análisis químico semi-cuantitativo, para lo cual se pulió una pequeña cantidad de catalizador que

fue introducida en metanol. Después de ser secada, la muestra fue escaneada en un microscopio electrónico de barrido marca Bruker (MEB-EDX Tescan) con analizador de rayos X (Quantax). Esto permitió determinar si se trata de un material silíceo o sílico-aluminoso según lo establecido en la norma INEN 490. Se realizó una repetición de cada análisis (Barrera, 2015, p. 35).

2.2 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DEL CATALIZADOR AGOTADO DE LA UNIDAD DE FCC Y DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN Y MORTERO ADICIONADOS CON EL MISMO

Para determinar la actividad puzolánica del catalizador agotado y de las propiedades mecánicas de hormigón y mortero fabricados con el mismo, fue necesario realizar una caracterización física del cemento y de los agregados fino y grueso utilizados en el presente proyecto, lo cual permitió establecer una dosificación patrón sobre la cual adicionar el catalizador. Para cada ensayo se realizó 3 repeticiones.

2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO

2.2.1.1 Densidad real del cemento

El cemento utilizado en el estudio fue cemento hidráulico Holcim para construcción en general tipo GU, el cual está diseñado para todo tipo de estructuras en condiciones normales y cumple los estándares de la norma NTE INEN 2380. Su composición se presenta en la Tabla 3.34. Para obtener la densidad real del cemento portland se utilizó la metodología que se indica en la norma ASTM C 188, el cual consistió en llenar un frasco de Le Chatelier con nafta hasta un punto entre las graduaciones de 0 y 1 cm³, registrar la lectura de volumen inicial (V_1) y pesar el frasco con la tapa en su lugar para obtener el peso

inicial (P_1). Posteriormente, un embudo fue utilizado para agregar cemento hasta que el nivel de nafta alcanzó un punto entre las marcas de 21 y 24 cm³ cuidando que el mismo no se adhiriera a las paredes del frasco. Al finalizar ésta etapa del procedimiento, el frasco fue tapado y agitado levemente con pequeños movimientos circulares durante 5 minutos para evitar la presencia de burbujas de aire atrapado. Después de dejar el frasco 5 minutos en reposo, se registró el peso final (P_2) y la lectura de volumen final (V_2). La densidad real del cemento fue calculada dividiendo la diferencia entre los pesos final e inicial para la diferencia entre los volúmenes final e inicial (ASTM, 2003a, p. 2; INEN, 2012c, p. 3).

2.2.1.2 Densidad suelta y compactada del cemento

Con el fin de ensayar la densidad compactada, se determinó el peso y las dimensiones de un molde de capacidad adecuada según la norma INEN 858 “Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos”. El molde fue llenado de cemento en tres etapas que fueron compactadas al levantar el recipiente y dejarlo caer sobre una superficie rígida 25 veces. Al final de la tercera etapa, se niveló la parte superior del molde. Para el obtener el valor de la densidad se restó el peso del recipiente vacío del peso del mismo con muestra y se dividió para el volumen calculado del recipiente. El mismo procedimiento de llenado del molde, ésta vez sin compactar la muestra, fue empleado para determinar la densidad suelta (INEN, 2010a, p. 4).

2.2.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS FINO Y GRUESO

2.2.2.1 Granulometría del agregado grueso

El tamaño de la muestra y los tamices necesarios para ensayar agregado grueso de 1 pulgada de tamaño nominal fueron seleccionados en correspondencia con lo indicado por la norma INEN 696. La muestra de agregado grueso fue secada en un horno a 110 °C por 18 horas y agitada mecánicamente en una torre de tamices

durante 10 minutos. Para poder calificar al material ensayado como agregado grueso, se verificó que su granulometría cumpla con los límites establecidos en la norma INEN 872 “Áridos para hormigón. Requisitos” (INEN, 2011a, p. 3).

2.2.2.2 Densidad suelta y compactada del agregado grueso

Con el fin de calcular de la densidad compactada se pesó un molde de capacidad adecuada y volumen conocido según la norma INEN 858 “Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos”. El molde fue llenado en tres etapas que fueron compactadas con 25 golpes de varilla distribuidos de manera uniforme en la superficie de la muestra. Al final de la tercera etapa, se niveló la parte superior del molde. Para el obtener el valor de la densidad se restó el peso del recipiente vacío del peso del mismo con muestra y se dividió para el volumen del recipiente. El mismo procedimiento de llenado del molde, ésta vez sin compactar, fue empleado para determinar la densidad suelta (INEN, 2010a, p. 4).

2.2.2.3 Densidad real y absorción del agregado grueso

El procedimiento aplicado para obtener la absorción y la densidad real del agregado grueso fue el establecido en la norma INEN 857 “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso”. Una muestra de 3 kg de agregado grueso fue secada en un horno a 110 °C, y fue lavada para separar pequeñas impurezas (INEN, 2010b, pp. 4-5).

Después de ser sumergida en agua durante un día fue secada con un paño y se obtuvo el peso en condición saturada superficialmente seca. Para determinar la masa aparente de la muestra se utilizó una balanza equipada con un canasto de alambre para sujetar la muestra dentro de agua a 23 °C. Después de secar la muestra en un horno a 110 °C, se determinó el peso y se calculó las propiedades de interés utilizando las ecuaciones [2.1] y [2.2] (INEN, 2010b, pp. 4-5).

$$\text{Densidad real (SSS) (kg/m}^3\text{)} = \frac{997,5 \times B}{(B - C)} \quad [2.1]$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(B - A)}{A} \times 100 \quad [2.2]$$

Donde:

A = Peso de muestra seca

B = Peso de muestra saturada superficialmente seca (SSS)

C = Peso aparente de muestra saturada

2.2.2.4 Granulometría y módulo de finura del agregado fino

Una muestra agregado fino de 500 g fue ensayada según lo establecido en la norma INEN 696. La muestra fue secada en un horno a 110 °C y agitada mecánicamente en una torre de tamices durante 5 minutos. Para poder calificar al material ensayado como agregado fino, se verificó que su granulometría cumpla con los límites establecidos en la norma INEN 872. El módulo de finura fue calculado como la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados hasta el tamiz No. 100 dividida para 100 (INEN, 2011b, pp. 2-3).

2.2.2.5 Densidad real y absorción del agregado fino

La metodología empleada para obtener la densidad real y la absorción del agregado fino fue el establecido en la norma INEN 856 “Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino”. Una muestra de 500 g de agregado fino fue secada en un horno a 110 °C y fue lavada para separar pequeñas impurezas. Después de ser sumergida en agua durante 24 horas fue secada y para verificar el cumplimiento de la condición saturada superficialmente seca se colocó la muestra dentro un molde metálico en forma de tronco de cono ubicado sobre una superficie plana con el lado de mayor

diámetro hacia abajo. Luego de compactar la muestra con 25 golpes de varilla, se observó si ésta conservó la forma del molde al ser levantado, lo cual sirvió como indicador de que la condición saturada superficialmente seca no se ha alcanzado (INEN, 2010c, pp. 4-7).

La muestra fue secada nuevamente hasta cumplir la condición y posteriormente fue colocada en un picnómetro lleno de agua hasta el 90 % de su volumen. Antes de llenar el frasco hasta la marca de aforo, las burbujas de aire atrapado fueron eliminadas y la temperatura fue ajustada a 23 °C. El peso del picnómetro lleno con muestra y agua fue determinado. El agregado fino fue extraído del picnómetro y fue pesado después de secarlo en el horno a 110 °C. El peso del picnómetro lleno con agua a 23 °C también fue determinado. Las propiedades de interés fueron calculadas mediante las ecuaciones [2.3] y [2.4] (INEN, 2010c, pp. 4-7).

$$\text{Densidad real (SSS) (kg/m}^3\text{)} = \frac{997,5 \times S}{(B + S - C)} \quad [2.3]$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(S - A)}{A} \times 100 \quad [2.4]$$

Donde:

A = Peso de muestra seca

B = Peso de picnómetro lleno con agua

C = Peso de picnómetro lleno con muestra y agua

S = Peso de muestra saturada superficialmente seca (SSS)

2.2.2.6 Contenido orgánico del agregado fino

El contenido orgánico fue determinado de acuerdo a la norma INEN 855 “Áridos. Determinación de la impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón”. Una muestra de 130 cm³ de agregado fino fue colocada en un recipiente de vidrio y se

le agregó una solución de NaOH al 3 % previamente preparada hasta que el volumen total fue de 200 cm³ después de agitar. El color del líquido sobrenadante fue examinado con el comparador de colores normalizados luego de un día de reposo (INEN, 2010d, pp. 2-3).

2.2.2.7 Densidad suelta y compactada del agregado fino

Las densidades suelta y compactada del agregado fino fueron determinadas siguiendo el método detallado en la sección 2.2.2.2.

2.2.3 DOSIFICACIÓN

Para obtener las cantidades necesarias para elaborar las mezclas de hormigón se siguió los pasos establecidos en la norma ACI 211.1 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”. Los pasos seguidos fueron los siguientes: selección del valor del asentamiento, selección del tamaño máximo nominal de los agregados, estimación del requerimiento de agua y del porcentaje de aire atrapado, determinación de la relación agua/cemento, determinación de la cantidad de cemento, cálculo del contenido de agregado grueso, cálculo del contenido de agregado fino y ajustes en mezclas de prueba (American Concrete Institute, 2014, p. 9).

2.2.3.1 Hormigón convencional

Con el método establecido en la sección 2.2.3 se obtuvieron los valores necesarios para diseñar 1 m³ de hormigón convencional para aplicación en obras civiles menores con resistencia a la compresión de 210 kg/cm². Este hormigón será apto para fabricar estructuras como: aceras, adoquines, bordillos y parterres (Chacón y Lema, 2012, p. 10).

2.2.3.2 Hormigón con adición de catalizador agotado

Para obtener hormigón con adición de catalizador agotado se sustituyó la cantidad de cemento obtenida en la sección 2.2.3.1 por diferentes porcentajes de catalizador y se evaluó sus propiedades mecánicas. Los porcentajes de sustitución de cemento por catalizador agotado fueron 5 %, 10 %, 15 % y 20 % (Torres et al., 2012, pp. 7-8).

2.2.4 EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE HORMIGÓN Y MORTERO

2.2.4.1 Evaluación de propiedades mecánicas en hormigón fresco

- **Tiempo de fraguado**

Este ensayo fue realizado utilizando el aparato de Vicat con base en lo establecido en la norma INEN 158 “Cemento Hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat”. La aguja de Vicat, cuyo diámetro es de 1 mm, fue empleada para penetrar pastas de cemento de consistencia normal, con base en el método A que indica el procedimiento para la utilización de un aparato manual de aguja de Vicat (INEN, 2009a, pp. 3-4).

El tiempo de fraguado inicial fue determinado como el lapso transcurrido desde que el agua y el cemento entraron en contacto hasta el momento en que la aguja penetró 25 mm o menos. El tiempo de fraguado final fue el correspondiente al tiempo medido desde que el agua y el cemento entraron en contacto hasta que la superficie de la muestra no pudo ser marcada completamente por la aguja. El tiempo de fraguado inicial fue calculado con aproximación a 1 minuto con la ecuación [2.5] (INEN, 2009a, pp. 3-4).

$$\left[\left(\frac{H - E}{C - D} \right) \times (C - 25) \right] + E \quad [2.5]$$

Donde:

E = Tiempo de la última inserción mayor a 25 mm (min)

H = Tiempo de la primera inserción menor a 25 mm (min)

C = Lectura de inserción al tiempo E (mm)

D = Lectura de inserción al tiempo H (mm)

- **Contenido de aire**

La cantidad de aire atrapado en muestras de hormigón fresco fue determinada utilizando el equipo medidor de aire según lo establecido en la norma ASTM C 231 "Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method". El equipo fue llenado de 3 capas de muestra de hormigón, cada capa fue compactada al ser golpeada de manera uniforme con una varilla 25 veces. La parte superior del molde fue nivelada para eliminar exceso de muestra. Luego de tapar el recipiente, ambas llaves de purga fueron abiertas y válvula principal de aire fue cerrada. La inyección agua por una de las llaves de purga hasta conseguir que salga por la llave de purga ubicada en la parte opuesta permitió asegurar la eliminación de aire. La válvula de escape de aire fue cerrada antes de bombear aire hacia el compartimiento hasta estabilizar la lectura del manómetro en la marca de inicio. Finalmente, la válvula que conecta la cámara de presión con el recipiente fue abierta y se leyó el contenido de aire en la mezcla de hormigón (ASTM, 2003b, pp. 3-5).

- **Calor de hidratación**

El calor de hidratación en soluciones de cemento puzolánico seco y de cemento puzolánico hidratado por 7 días fue medido con base en lo especificado por la INEN 199 "Cemento Hidráulico. Determinación del calor de hidratación". La capacidad térmica del equipo fue determinada midiendo el aumento de temperatura corregida obtenido al disolver 7 gramos de óxido de zinc calcinado en

la mezcla de ácidos. El vaso de vacío fue llenado con 400 gramos de ácido nítrico 2 N enfriado aproximadamente 5 °C por debajo de la temperatura ambiente. El peso de la solución fue alcanzado al añadir 8 cm³ de ácido fluorhídrico y aumentar ácido nítrico hasta que el total fue de 425 gramos. Al finalizar el período de agitación inicial de 20 minutos, se registró la temperatura del laboratorio, la temperatura del ácido y el tiempo. La temperatura fue leída nuevamente a los 20 minutos (período de disolución) y a los 40 minutos (período de corrección) después de haber introducido la muestra de óxido de zinc. El calor de solución de una muestra de cemento puzolánico seco fue determinado utilizando el método seguido para determinar la capacidad térmica del equipo, pero con una muestra de 3 gramos de cemento puzolánico seco en lugar de óxido de zinc. El mismo procedimiento fue empleado para determinar el calor de solución de una muestra de cemento puzolánico parcialmente hidratada por 7 días. La muestra calorimétrica que se utilizó fue de 4,18 gramos (INEN, 2009b, pp. 5-6).

- **Requerimiento de agua**

La cantidad requerida para diseñar las mezclas de hormigón deseadas para el proyecto fue calculada de acuerdo con el valor del asentimiento seleccionado y el tamaño nominal de los agregados según lo establecido en la sección 2.2.3. Estos valores permitieron determinar el agua que se necesita por m³ de hormigón. La relación agua/cemento que permitió determinar los litros de agua por cada kg de cemento fue definida con base en el valor de resistencia a la compresión presentado en la sección 2.2.3.1.

2.2.4.2 Evaluación de propiedades mecánicas en hormigón endurecido

- **Resistencia a la compresión**

Con el objetivo de obtener la resistencia a la compresión se siguió el método detallado en la norma INEN 1573 “Hormigón de cemento hidráulico.

Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico”. Se aplicó una carga axial de compresión a probetas cilíndricas preparadas y curadas según la norma INEN 1576 “Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo”. La carga axial se aplicó a una velocidad de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s hasta provocar la fractura de la probeta. Al dividir la máxima carga alcanzada para el área de la sección transversal de cada probeta, se obtuvo la resistencia a la compresión. Las dimensiones de las probetas fueron 30 cm y 15 cm de altura y de diámetro respectivamente. Las dosificaciones especificadas en las secciones 2.2.3.1 y 2.2.3.2 fueron empleadas para elaborar las probetas cilíndricas, las cuales fueron curadas durante 3, 7, 14 y 28 días (INEN, 2010e, pp. 6-7; INEN, 2011c, p. 4).

- **Expansión y contracción en autoclave**

La expansión y contracción del hormigón fue determinada mediante el proceso detallado en la norma INEN 200 “Cemento Hidráulico. Determinación de la expansión en autoclave”. Las probetas de 25 mm por 25 mm por 285 mm fueron curadas durante 24 horas y se midió su longitud. Seguidamente, las probetas fueron colocadas en el autoclave y se verificó que estén ubicadas de tal manera que puedan estar expuestas al vapor saturado. El autoclave fue llenado con agua hasta ocupar 10 % de su volumen.

El calentador del autoclave fue encendido y se aumentó la temperatura a un ritmo que permitió alcanzar una presión de vapor de 2 MPa en aproximadamente 60 minutos. Después de mantener esta presión por un período de 3 horas, el calentador fue apagado y se enfrió el autoclave a un ritmo que permitió alcanzar una presión menor a 0,07 MPa en 90 minutos. El agua del autoclave fue enfriada hasta 23 °C y se mantuvo esta temperatura por 15 minutos. Las probetas fueron retiradas del agua para determinar el cambio de longitud de cada una. Los resultados se reportaron como un porcentaje de su longitud inicial (INEN, 2009c, pp. 3-4).

- **Test de lixiviación TCLP**

La toxicidad de las muestras de hormigón con adición puzolánica de catalizador agotado fue determinada utilizando el método EPA 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). La relación sólido-líquido de la pulpa preparada fue de 1:20, para esto se añadió 200 cm³ de agua destilada a muestras de hormigón de 10 g en un vaso de precipitación. El pH de la pulpa fue medido y regulado añadiendo ácido acético al 20 % hasta alcanzar un valor igual a 4. La solución fue agitada durante un día y se determinó la concentración de los metales que se consideran tóxicos utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer AAnalyst 300. Los metales analizados fueron: Ag, As, Cd, Cr, Hg, Pb, Se (EPA, 1992, p. 18).

2.2.4.3 Evaluación de propiedades mecánicas en mortero

- **Contenido de aire**

En las muestras de mortero se determinó el contenido de aire utilizando la metodología presentada en la sección 2.2.4.1.

- **Índice de actividad puzolánica**

Para obtener el índice de actividad puzolánica se preparó 3 probetas de mortero estándar y 3 probetas de mortero sustituido con catalizador agotado de acuerdo a la norma INEN 496 "Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica". Las probetas consistieron en paralelepípedos de 40 mm por 40 mm por 160 mm que fueron sometidas a ensayos de resistencia a la flexión. Los pedazos restantes del ensayo de flexión fueron sujetos a ensayos de compresión. La dosificación utilizada para la preparación de las probetas fue la establecida en la norma antes mencionada. El índice de actividad puzolánica fue calculado mediante la ecuación [2.6] (INEN, 1980, pp. 1-2).

$$Ip = \frac{R}{R_1} \times 100 \quad [2.6]$$

Donde:

Ip = Actividad puzolánica en porcentaje (%)

R = Promedio de esfuerzo de compresión de mortero adicionado

R_1 = Promedio de esfuerzo de compresión de mortero estándar

- **Expansión en mortero**

Con el fin de determinar la expansión en las muestras de mortero se siguió el mismo procedimiento para determinar la expansión en autoclave del hormigón descrito en la sección 2.2.4.2, con la diferencia de que las probetas fueron curadas durante 14 días para este caso.

- **Contracción por secado**

El ensayo de contracción por secado fue realizado midiendo el cambio de longitud de probetas de mortero de 25 mm por 25 mm por 285 mm según lo expresado en la norma INEN 2504 "Mortero y Hormigón. Determinación del cambio de longitud del mortero y del hormigón endurecidos". Las probetas fueron almacenadas en la cámara de curado a una distancia de 25 mm entre ellas y las superficies de las paredes de la cámara. Las mediciones de longitud fueron realizadas al finalizar el moldeo y después de haber sido almacenadas en la cámara de curado durante 7, 14, 28 y 60 días. El cambio de longitud fue calculado en cada período y los resultados fueron reportados como un porcentaje de variación con respecto a la longitud inicial (INEN, 2009d, p. 5).

- **Resistencia a los sulfatos**

El ensayo fue realizado midiendo el cambio de longitud de probetas de mortero de 25 mm por 25 mm por 285 mm como se especifica en la norma INEN 2503 “Cemento Hidráulico. Determinación del cambio de longitud en morteros expuestos a una solución de sulfato”. Las probetas fueron almacenadas en la cámara de curado sumergidas en una solución de sulfato de sodio de 50 g/L de concentración. Las mediciones de longitud fueron realizadas al finalizar el moldeo y después de haber sido almacenadas en la solución de sulfato de sodio durante 7, 14, 28 y 60 días. El cambio de longitud fue calculado en cada período y los resultados fueron reportados como un porcentaje de su longitud inicial (INEN, 2009e, p. 4).

2.3 DISEÑO DE PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO

Para definir la capacidad de producción y desarrollar la ingeniería básica de la planta piloto de cemento portland puzolánico, se consideró el mejor porcentaje de sustitución de cemento por catalizador agotado y la cantidad que la Refinería Esmeraldas desecha diariamente de este material. Adicionalmente, se determinó las cantidades de agregado fino y agregado grueso necesarias para producir hormigón con el tipo de cemento antes mencionado siguiendo la dosificación obtenida para alcanzar una resistencia de 210 kg/cm². Para seleccionar el lugar donde se ubicará la planta se comparó algunos aspectos como la disponibilidad de materia prima, disponibilidad de servicios industriales, facilidad de transporte y el clima (Deolalkar, 2009, pp. 6-140).

En el diseño de la planta se incluyó la descripción del proceso, diagramas del proceso (BFD, PFD y P&ID), distribución en planta, balances de masa y energía, requerimiento de servicios, dimensionamiento y selección de equipos. Los tamices utilizados en el proceso se diseñaron calculando el área de tamizado, obtenida al dividir el flujo de alimentación para una constante. Las trituradoras

fueron seleccionadas de catálogos con base en el tamaño de la materia prima a la entrada y salida de dichos equipos. El precalentador, el horno y el enfriador fueron seleccionados de catálogos de acuerdo a su capacidad. Las dimensiones de los molinos y su potencia se calcularon mediante las ecuaciones de Bond (Duda, 2003, pp. 81- 85).

2.4 COMPARACIÓN ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO CON CATALIZADOR AGOTADO DE LA UNIDAD DE FCC CON LA PRODUCCIÓN DE LOS MISMOS SIN ADICIÓN.

El análisis económico del proyecto fue realizado con base en los resultados del diseño de la planta presentados en la sección 3.6, en la cual se detalla el proceso de producción de 300 sacos de cemento portland puzolánico por día y hormigón elaborado con este mismo material. Los parámetros económicos evaluados fueron el valor actual neto (VAN), y la tasa interna de retorno (TIR).

Se contabilizó los egresos del proyecto que corresponden a la inversión inicial, costos fijos, costos variables y depreciaciones de maquinaria y equipos. El único ingreso que se obtiene en el proceso es por la venta de sacos de cemento portland puzolánico. La inversión inicial para poner en marcha la planta de producción de cemento portland puzolánico incluye los costos de materia prima, maquinaria, edificaciones, terreno, permisos municipales.

Con estos parámetros se desarrolló el flujo de fondos que incluyó: la inversión total (costos de terreno, equipos, materias primas), costos fijos (sueldos de empleados, mantenimiento), costos variables (requerimientos industriales, combustible), depreciación de maquinaria e ingresos por la venta del producto. El estudio se realizó para un caso hipotético en el que la operación de la planta dure 10 años de funcionando 330 días al año y los días restantes se destinan para mantenimiento de equipos (Alsop, 2001, p. 171).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN CATALIZADOR AGOTADO

3.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL CATALIZADOR AGOTADO

3.1.1.1 Granulometría y finura del catalizador agotado

Los resultados del análisis granulométrico se indican en la Tabla 3.1. Estos datos fueron utilizados para graficar las curvas granulométricas y determinar el d_{80} del catalizador agotado.

Tabla 3.1. Granulometría del catalizador agotado

Malla #	Abertura (μm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje pasado acumulado (%)
20	850,0	0,5	0,2	0,2	99,8
30	600,0	0,3	0,1	0,3	99,7
40	425,0	0,2	0,1	0,4	99,6
50	300,0	0,6	0,2	0,6	99,4
60	250,0	0,3	0,1	0,7	99,3
70	212,0	0,1	0,0	0,7	99,3
80	180,0	0,4	0,1	0,9	99,1
100	150,0	4,3	1,5	2,4	97,6
150	106,0	49,2	17,4	19,8	80,2
200	75,0	138,8	49,2	69,0	31,0
270	53,0	66,1	23,4	92,4	7,6
325	45,0	15,1	5,4	97,8	2,2
400	38,0	4,4	1,6	99,4	0,6
Fondo	---	1,8	0,6	100,0	0,0
	Total	282,1	100,0	---	---

Las Figura 3.1 y Figura 3.2 corresponden a las curvas granulométricas del catalizador agotado. En estas figuras se puede observar que el 20 % de la

muestra de catalizador agotado es retenido en aberturas mayores a 106 μm , mientras que el 80 % pasa de la abertura de 106 μm . Por lo tanto, el d_{80} del catalizador agotado es 106 μm , tamaño mucho mayor al necesario para sustituir al cemento en las mezclas de hormigón y mortero que es de 45 μm como lo establece la norma INEN 490 (INEN, 2011d, p. 7).

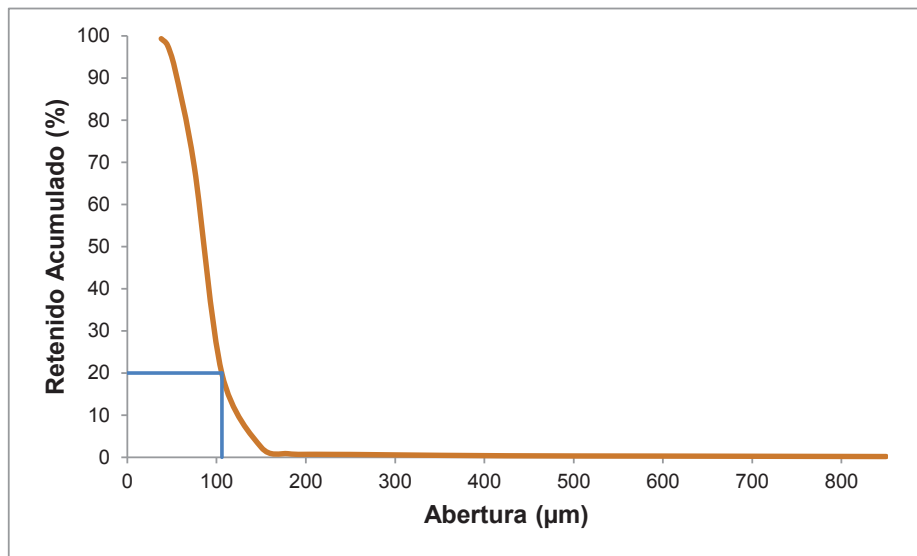


Figura 3.1. Porcentaje retenido acumulado del catalizador vs abertura de la malla del tamiz (μm)

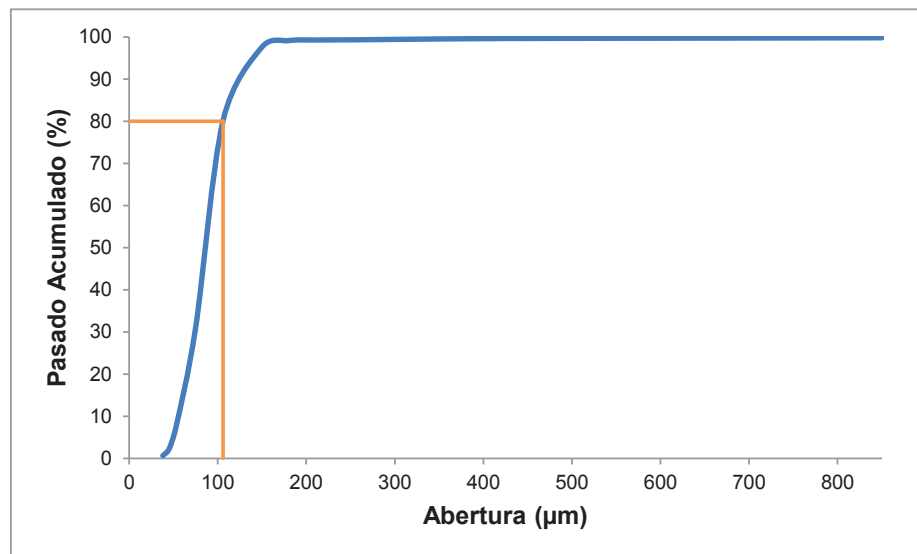


Figura 3.2. Porcentaje pasado acumulado del catalizador agotado vs abertura de la malla del tamiz (μm)

Los materiales que se adicionen al cemento deben ser del mismo tamaño ya que una diferencia de tamaños puede provocar la formación de espacios donde se puede acumular aire, lo cual puede causar agrietamientos durante el curado de las mezclas de hormigón y mortero. Para reducir el tamaño de partícula del catalizador agotado de 106 μm a 45 μm , se utilizó un pulverizador Siebtechnik modelo T-100 durante 45 segundos. Se comprobó el cumplimiento del tamaño deseado haciendo pasar el material pulverizado por un tamiz de malla No. 325, y volviendo a pulverizar el material retenido en dicho tamiz (Blanco, 2005, pp. 1-16).

3.1.1.2 Densidad real del catalizador agotado

En la Tabla 3.2 se indican los pesos y volúmenes promedio que fueron utilizados para calcular la densidad real del catalizador. En el Anexo I se detalla el procedimiento para calcular esta propiedad.

Tabla 3.2. Resultados de la densidad real del catalizador agotado

Parámetro	Valor	Unidad
P ₁	329,1	g
V ₁	0,6	mL
P ₂	382,4	g
V ₂	21,4	mL
Densidad	2,57	g/cm ³

Las normas que tratan el diseño de mezclas de hormigón y mortero no establecen un rango específico dentro del cual deban encontrarse los valores de densidad real de los materiales puzolánicos. Sin embargo, al comparar el valor de la densidad real del catalizador agotado con el de otras puzolanas, se observa que presentan valores similares. La densidad real del catalizador agotado se encuentra dentro de los límites empíricos en los que generalmente se encuentran las densidades reales de materiales puzolánicos como ceniza volante, humo de sílice y arcilla calcinada pero no dentro del rango determinado para escoria de altos hornos. La densidad real del catalizador agotado se utilizó para la

determinación de las proporciones en la dosificación de las mezclas de mortero. Los rangos de densidad real empíricos de los materiales puzolánicos se presentan en la Tabla 3.3 (Yazici, 2010, pp. 57-61)

Tabla 3.3. Rangos de densidad real de varios materiales puzolánicos

Material Puzolánico	Rango de densidad real (g/cm³)
Ceniza volante	1,90 - 2,80
Escoria de altos hornos	2,85 - 2,95
Humo de sílice	2,20 - 2,60
Arcilla calcinada	2,40 - 2,61

(Yazici, 2010, pp. 57-61)

3.1.2 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL CATALIZADOR AGOTADO

3.1.2.1 Difracción de rayos X

Los minerales presentes en el catalizador agotado con sus respectivas fórmulas se muestran en la Tabla 3.4. El difractograma resultante de la caracterización mineralógica mediante análisis de rayos X se muestra en el Anexo I.

Tabla 3.4. Compuestos del catalizador FCC detectados por difracción de rayos X

Mineral	Fórmula química
Faujasita	$(Mg,Na,K,Ca)_n(Si,Al)_{12}O_{24} \cdot 15H_2O$
Caolinita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_2$
Boehmita	$(OH)AlO$
Moscovita	$Al(Si_3O_{10})KAl_2(OH,F)_2$

(Barrera, 2015, p. 53)

Los componentes que posee el catalizador agotado fueron cualificados con el software Diffrac Plus del difractómetro de rayos X marca Bruker modelo D8 Advance, el cual permite determinar los minerales que constituyen un material

comparando los picos presentados en el difractograma con su base de datos. En el programa se observó que el mineral faujasita constituye aproximadamente el 80 % del total de dicho catalizador. Este mineral está presente dentro del catalizador envuelto en una matriz conformada por caolinita, boehmita y moscovita. El componente activo del catalizador está constituido por el mineral faujasita, el cual es de tipo zeolítico (Barrera, 2015, p. 53).

3.1.2.2 Resultados del análisis químico semi-cuantitativo

Los resultados del análisis del catalizador agotado realizados en un microscopio electrónico de barrido marca Bruker (MEB-EDX Tescan) con analizador de rayos X (Quantax) se presentan en la Tabla 3.5. Entre los componentes mayoritarios se encuentran aluminio y silicio con 30,4 % y 29,7 % en peso respectivamente, mientras que el resto de componentes no superan el 3 % en peso cada uno (Barrera, 2015, p. 50).

Esto se debe a que el catalizador agotado está conformado por una matriz de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3). Estos resultados demuestran que este material cumple con el requerimiento establecido en la norma INEN 490, la cual enuncia que los aditivos puzolánicos deben ser de composición silíceo o sílico-aluminosa (INEN, 2011d, p. 3).

Tabla 3.5. Composición elemental del catalizador FCC

Elemento	Composición (%)
Aluminio	30,4
Silicio	29,7
Vanadio	2,2
Molibdeno	1,6
Titanio	1,4
Níquel	1,2
Hierro	1,1
Mercurio	15,0 mg/kg
Plomo	20,0 mg/kg

(Barrera, 2015, p. 50)

3.2 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN CEMENTO

3.2.1 DENSIDAD REAL DEL CEMENTO

En la Tabla 3.6 se muestra la densidad real del cemento, al igual que los pesos y volúmenes promedio utilizados para calcularla. Los valores mínimo y máximo para la densidad real del cemento portland son 2,90 y 3,15 g/cm³ respectivamente. El valor de densidad real del cemento utilizado en este proyecto fue de 2,84 g/cm³, éste valor se encuentra por debajo de los límites establecidos, sin embargo, es aceptable ya que éste no es un indicador de la calidad del cemento y su única utilidad fue en el cálculo de las proporciones en la dosificación de las mezclas de hormigón. En el Anexo II se explica en detalle el procedimiento para determinar estas proporciones (Polanco, 2014, p. 8).

Tabla 3.6. Densidad real del cemento

Parámetro	Valor	Unidad
P ₁	328,6	g
V ₁	0,6	mL
P ₂	387,15	g
V ₂	21,25	mL
Densidad	2,84	g/cm ³

3.2.2 DENSIDAD SUELTA Y COMPACTADA DEL CEMENTO

Los pesos y el volumen del molde medidos para calcular la densidad suelta y compactada del cemento, al igual que los resultados, se exhiben en la Tabla 3.7. La densidad suelta fue 1,05 g/cm³, lo cual se encuentra dentro de los límites que establecen que el valor mínimo aceptable es 0,96 g/cm³ y el máximo 1,28 g/cm³. El valor de la densidad compactada fue 1,32 g/cm³ y cumple con los límites señalados en las normas de diseño y proporción de mezclas de hormigón que son mínimo 1,20 g/cm³ y máximo 1,40 g/cm³. Los pasos seguidos para calcular estas propiedades se explican en el Anexo II (Kosmatka et al., 2004, p. 67).

Tabla 3.7. Resultados de la densidad suelta y compactada del cemento

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de molde	158,00	g
Volumen de molde	298,25	cm ³
Peso de muestra suelta + molde	471,10	g
Densidad suelta	1,05	g/cm ³
Peso de muestra compactada + molde	552,05	g
Densidad Compactada	1,32	g/cm ³

3.3 RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

3.3.1 CARACTERIZACIÓN AGREGADO GRUESO

3.3.1.1 Granulometría del agregado grueso

Se seleccionó el tamaño de la muestra y los tamices necesarios para ensayar agregado grueso de 1 pulgada de tamaño nominal según lo indicado en la norma INEN 696. Se agitó la muestra mecánicamente en una torre de tamices durante 10 minutos. La Tabla 3.8 muestra los resultados del análisis granulométrico del agregado (INEN, 2011a, p. 3).

Tabla 3.8. Granulometría del agregado grueso

Malla #	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje pasado acumulado (%)	Logaritmo de abertura de tamiz
1 ½	38,1	0,0	0,0	0,0	100,0	1,6
1	25,4	348,2	3,5	3,5	96,5	1,4
¾	19,1	1 342,7	13,4	16,9	83,1	1,3
½	12,7	2 623,6	26,2	43,1	56,9	1,1
3/8	9,5	1 503,9	15,0	58,2	41,8	1,0
4	4,8	3 206,0	32,1	90,2	9,8	0,7
Bandeja	---	976,3	9,8	100,0	0,0	---
	Total	10 000,7	100,0	---	---	---

Para que un material pueda ser utilizado como agregado grueso debe cumplir con las especificaciones de granulometría señaladas por la INEN 872. En la Tabla 3.9 se indican los valores mínimos y máximos de cantidad de muestra que debe pasar en cada tamiz establecidos por la norma.

Tabla 3.9. Límites de la norma INEN 872 para agregado grueso de 1 pulgada de tamaño nominal

Abertura del Tamiz (mm)	Porcentaje en masa que debe pasar (%)	
	Mín.	Máx.
37,5	100	100
26,5	95	100
13,2	25	60
4,75	0	10

(INEN, 2011b, p. 5)

El cumplimiento de la norma se verificó graficando el porcentaje pasado acumulado de la granulometría vs el logaritmo de la abertura del tamiz y se verificó que la curva se encuentre dentro de los límites de las curvas graficadas con los valores de la norma. Esto se observa en la Figura 3.3.

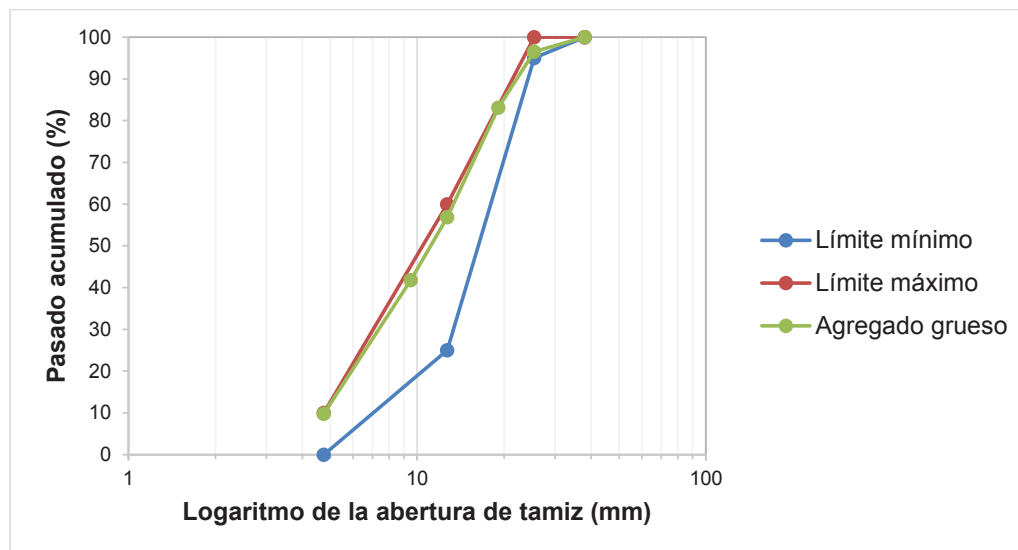


Figura 3.3. Porcentaje pasado acumulado de agregado grueso vs logaritmo de la abertura del tamiz (mm)

La curva granulométrica del agregado grueso se acerca al límite máximo establecido en la norma pero no lo sobrepasa, por lo que se acepta el material como apto para fabricar mezclas de hormigón.

3.3.1.2 Densidad real y absorción del agregado grueso

En la Tabla 3.10 se presentan los valores necesarios para calcular la densidad real y absorción y los valores calculados del agregado grueso.

Tabla 3.10. Resultados de la densidad real y absorción del agregado grueso

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de muestra seca (A)	2873,80	g
Peso de muestra SSS (B)	3001,20	g
Peso aparente de muestra (C)	1817,50	g
Densidad (SSS)	2,53	g/cm ³
Absorción	4,43	%

La densidad real en condición saturada seca, cuyo valor fue de 2,53 g/cm³, cumple con el requisito del Instituto Americano del Concreto (ACI) que establece que la densidad real de los agregados debe estar entre 2,4 y 2,9 g/cm³. La absorción del agregado grueso fue de 4,43 % y también cumple con el requisito que establece que debe ser menor a 5 %. El procedimiento para calcular estas propiedades se detalla en el Anexo II (American Concrete Institute, 2013, p. 3).

3.3.1.3 Densidad suelta y compactada del agregado grueso

Los pesos y el volumen del molde medidos para calcular la densidad suelta y compactada del agregado grueso se presentan en la Tabla 3.11. El valor calculado de la densidad suelta del agregado grueso es de 1,41 g/cm³, el cual se encuentra dentro de los límites que establecen que el valor mínimo aceptable es 1,40 g/cm³ y el máximo 1,50 g/cm³. El valor calculado de la densidad compactada

del agregado grueso es 1,49 g/cm³ y también cumple con los límites especificados para el diseño y proporción de mezclas de hormigón que son mínimo 1,50 g/cm³ y máximo 1,70 g/cm³ (Velezmoro, Blanco, Peñuela, 2014, p. 63).

Tabla 3.11. Resultados de la densidad suelta y compactada del agregado grueso

Variable	Valor	Unidad
Peso de molde	5 468	g
Volumen de molde	13 975,80	cm ³
Peso de muestra suelta + molde	25 195	g
Densidad suelta	1,41	g/cm ³
Peso de muestra compactada + molde	26 235	g
Densidad Compactada	1,49	g/cm ³

3.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO

3.3.2.1 Granulometría y módulo de finura del agregado fino

Los resultados de granulometría del agregado fino se indican en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Granulometría del agregado fino

Malla #	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje pasado acumulado (%)	Logaritmo de la abertura del tamiz
3/8	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	0,98
4	4,75	24,90	4,95	4,95	95,05	0,68
8	2,36	77,10	15,33	20,28	79,72	0,37
16	1,18	102,60	20,40	40,68	59,32	0,07
30	0,60	93,00	18,49	59,17	40,83	-0,22
50	0,30	90,30	17,95	77,12	22,88	-0,52
100	0,15	80,70	16,04	93,16	6,84	-0,82
200	0,08	25,10	4,99	98,15	1,85	-1,12
Bandeja	---	9,30	1,85	100,00	0,00	---
	Total	503,00	100,00	---	---	---

Para que un material pueda ser utilizado como agregado fino debe satisfacer las especificaciones de granulometría establecidas en la norma INEN 872 mostradas en la Tabla 3.13. El cumplimiento de la norma fue verificado al graficar el porcentaje pasado acumulado de la granulometría versus el logaritmo de la apertura del tamiz. En la Figura 3.4 se observa que la curva granulométrica del agregado fino se encuentra dentro de los límites de las curvas graficadas con los valores de la norma.

Tabla 3.13. Límites de la norma 872 para agregado fino

Abertura del Tamiz (mm)	Porcentaje en masa que debe pasar (%)	
	Mín.	Máx.
9,500	100	100
4,750	95	100
2,360	80	100
1,180	50	85
0,600	25	60
0,300	10	30
0,150	2	10
0,075	0	5

(INEN, 2011b, p. 2)

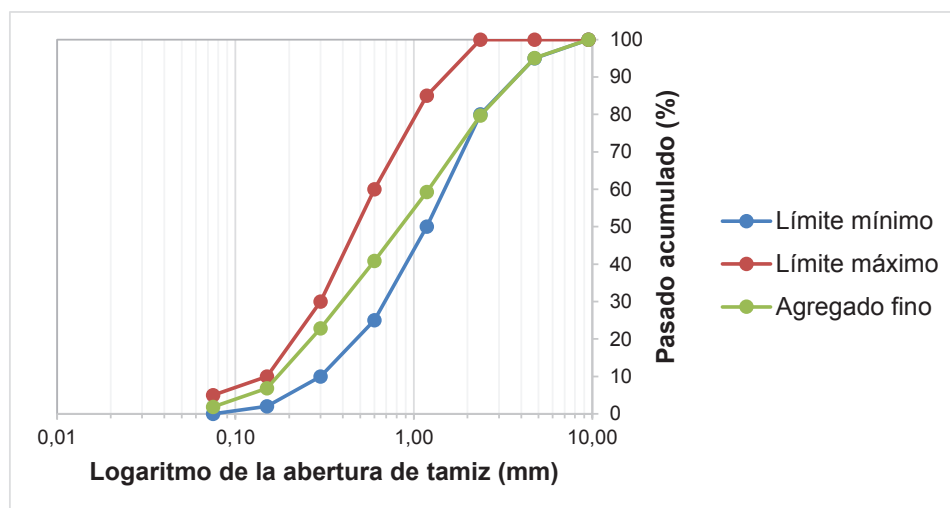


Figura 3.4. Porcentaje pasado acumulado de agregado fino vs logaritmo de la apertura del tamiz (mm)

El agregado fino se acepta como material apto para fabricar mezclas de hormigón ya que su curva granulométrica se encuentra dentro de los límites establecidos en la INEN 872.

El módulo de finura del agregado fino fue de 2,95 y cumple con los límites establecidos que dictan que el valor debe estar entre 2,30 y 3,10. Este valor fue calculado como la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados hasta el tamiz de malla No. 100 dividida para 100 (American Concrete Institute, 2013, p. 3).

3.3.2.2 Densidad real y absorción del agregado fino

En la Tabla 3.14 se indican los valores de densidad real y absorción del agregado fino.

Tabla 3.14. Resultados de densidad real y absorción de agregado fino

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad (SSS)	2,31	g/cm ³
Absorción	9,79	%

La densidad real, cuyo valor calculado fue de 2,31 g/cm³, cumple con el requisito del Instituto Americano del Concreto que establece que la densidad real de los agregados debe estar entre 2,4 y 2,9 g/cm³. La absorción del agregado fino fue de 9,79 % y también cumple con el requisito que establece que debe ser menor a 10 %. El procedimiento para calcular estas propiedades se detalla en el Anexo II (American Concrete Institute, 2013, p. 3; Malisch, 2010, p. 88)

3.3.2.3 Densidad suelta y compactada del agregado fino

Los pesos y el volumen del molde promedio para calcular la densidad suelta y compactada del agregado fino se presentan en la Tabla 3.15. El valor de la densidad suelta del agregado fino es de 1,67 g/cm³, el cual se encuentra dentro

de los límites que establecen que el valor mínimo aceptable es 1,50 g/cm³ y el máximo 1,70 g/cm³. El valor de la densidad compactada del agregado fino es 1,84 g/cm³ y también cumple con los límites especificados para el diseño y proporción de mezclas de hormigón que son mínimo 1,70 g/cm³ y máximo 1,90 g/cm³. Los pasos para calcular estas propiedades se detallan en el Anexo II (Velezmoro, Blanco, Peñuela, 2014, p. 63).

Tabla 3.15. Resultados de la densidad suelta y compactada de agregado fino

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de molde	4 818	g
Volumen de molde	9 233,71	cm ³
Peso de muestra suelta + molde	20 210	g
Densidad suelta	1,67	g/cm ³
Peso de muestra compactada + molde	21 790	g
Densidad Compactada	1,84	g/cm ³

3.3.2.4 Contenido orgánico del agregado fino

La norma INEN 855 establece que una muestra contiene impurezas orgánicas cuando produce colores más oscuros que el color normalizado No. 3 de la escala del comparador. Colores normalizados a los que les corresponde números más altos indican mayor contenido de impurezas.

El líquido sobrenadante de la muestra de agregado fino obtenido al finalizar el ensayo presentó poca turbidez y un color más claro que el No. 1 del comparador de colores normalizados, con esto se determinó que el agregado fino no contenía impurezas orgánicas que afecten el rendimiento al ser utilizado en hormigón o mortero ya que este color es el menor de la escala y es indicador de que el contenido de material contaminante es aceptable. En el Anexo II se exponen los resultados del ensayo (INEN, 2010d, pp. 2-3).

3.4 RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN

3.4.1 HORMIGÓN CONVENCIONAL

La dosificación calculada para preparar 1 m³ de hormigón convencional de resistencia a la compresión igual a 210 kg/cm² se observa en la Tabla 3.16. En el Anexo III se especifican los pasos seguidos para obtener estos valores.

Tabla 3.16. Dosificación en peso de 1 m³ de hormigón convencional de resistencia a la compresión de 210 kg/cm²

Componentes	Peso (kg)
Cemento	309,79
Agua	193,00
Agregado grueso	950,99
Agregado fino	723,77
Relación en peso de los componentes	1,00 : 0,62 : 3,07 : 2,34

3.4.2 HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CATALIZADOR AGOTADO

En la Tabla 3.17 se indican las proporciones para la dosificación de las muestras que fueron adicionadas con catalizador agotado.

Tabla 3.17. Dosificación en peso para 1 m³ de hormigón con diferentes porcentajes de catalizador agotado

Material	Porcentaje de sustitución de cemento por catalizador (%)			
	5	10	15	20
	Peso (kg)			
Cemento	294,3	278,8	263,3	247,8
Agua	193,0	193,0	193,0	193,0
Agregado fino	723,8	723,8	723,8	723,8
Agregado grueso	951,0	951,0	951,0	951,0
Catalizador	15,5	31,0	46,5	62,0

En estas muestras se restó 5, 10, 15 y 20 % de la cantidad de cemento calculada para la mezcla patrón de hormigón convencional y se reemplazó este valor por una cantidad igual de catalizador agotado.

3.5 RESULTADOS DE LAS PROPIEADES DE HORMIGÓN Y MORTERO

3.5.1 RESULTADOS DE ENSAYOS EN HORMIGÓN FRESCO

3.5.1.1 Tiempo inicial de fraguado

Los resultados de los ensayos de tiempo inicial de fraguado para las muestras de cemento puro y cemento con varios porcentajes de adición puzolánica se exponen en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Tiempo de fraguado de cemento patrón y cemento con adición de catalizador agotado

Muestra	Cemento Patrón	Cemento con adición de catalizador agotado			
		5 %	10 %	15 %	20 %
Tiempo de fraguado (min)	233	220	200	186	171

La norma INEN 2380 establece que el tiempo de fraguado inicial del cemento portland no debe ser menor a 45 minutos ni mayor a 420 minutos. El tiempo de fraguado final de un cemento generalmente es de entre 4 y 8 horas (Holcim, 2014, p. 9; Gabalec, 2008, p. 3).

En la Tabla 3.18 se observa que el tiempo inicial de fraguado del cemento sin adición o cemento patrón utilizado en el proyecto es de 233 minutos, valor que se mantiene dentro del rango especificado en la norma INEN 2380. Los cementos adicionados con 5, 10, 15 y 20 % de catalizador agotado presentan un tiempo inicial de fraguado menor al reportado para el cemento sin adición.

El tiempo inicial de fraguado de las muestras de cemento adicionadas con catalizador agotado es más corto debido a un efecto de dilución, hay menor cantidad de sulfatos presente en la mezcla por tener menor contenido de cemento portland. La disminución del tiempo inicial de fraguado en estas muestras también se debe a la alta reactividad que el catalizador agotado proporciona a la mezcla, ya que éste acelera la hidratación del cemento, lo cual provoca que aumente la velocidad de las reacciones que ocurren cuando el cemento entra en contacto con el agua (Borrachero et al., 2014, pp. 60-65).

El tiempo de fraguado inicial indica el intervalo de tiempo disponible para que el cemento sea sometido a vibraciones sin sufrir daños en su estructura interna. Después de este momento su estructura puede ser dañada debido al nivel de rigidez que ha alcanzado. Es esencial conocer el tiempo de fraguado ya que éste proporciona datos necesarios para planear los tiempos de acabado de una obra. Si se trabaja con un cemento que fragua muy rápido, se dispone de menos tiempo para manipularlo (Gabalec, 2008, p.3).

La reducción en el tiempo inicial de fraguado que provoca la inclusión de catalizador agotado hace que este tipo de cemento sea adecuado para trabajar en obras en las que se requiera alcanzar la resistencia máxima en periodos de tiempo cortos: puentes y pavimento, muros de contención, reparación de fisuras en túneles y pozos, tubos y alcantarillas de hormigón, obras expuestas a mareas y aguas subterráneas (Vilssa, 2014, p. 2).

3.5.1.2 Contenido de aire

Los resultados de las pruebas de contenido de aire de las muestras de hormigón fresco se exponen en la Tabla 3.19. En el hormigón convencional el contenido de aire fue de 1,4 %, lo cual es aceptable ya que es menor al valor de 1,5 % establecido en la Tabla AIII.4 que permite determinar el agua requerida y la cantidad de aire que puede quedar retenido al dosificar hormigón que utiliza agregado grueso de 1 pulgada de tamaño nominal.

Tabla 3.19. Contenido de aire de hormigón convencional y hormigón con adición de catalizador agotado

Muestra	Hormigón convencional	Hormigón con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
Contenido de aire (%)	1,4	1,3	1,4	1,8	2,1

Las muestras de hormigón adicionadas con 5 % y 10 % de catalizador agotado también el requisito ya que presentan contenidos de aire de 1,3 y 1,4 % respectivamente. Las muestras de hormigón adicionadas con 15 % y 20 % de catalizador agotado presentaron porcentajes de contenido de aire de 1,8 % y 2,1 % respectivamente, lo cual no cumple con la estimación aproximada. Las muestras de hormigón adicionadas con catalizador agotado presentan mayor porcentaje de contenido de aire ya que éstas son menos permeables que las de hormigón convencional, por lo tanto, no permiten el escape del aire que queda atrapado durante el moldeo de los especímenes. La menor permeabilidad de estas muestras se debe a que las reacciones puzolánicas ocurren dentro de los poros del catalizador agotado. Adicionalmente, el intervalo de tiempo para que el aire escape de la mezcla es menor debido a que estas muestras presentan un tiempo de fraguado más corto (Borrachero et al., 2014, pp. 60-65).

Un porcentaje de contenido de aire mayor al deseado puede causar agrietamientos en el hormigón una vez que ha sido curado, sin embargo, la incorporación de aire presenta más ventajas que desventajas ya que su presencia disminuye la demanda de agua en la mezcla de hormigón, mejora la trabajabilidad, sirve de protección contra la humedad, compensa la falta de finos en los agregados y hace que las estructuras sean menos susceptibles a variaciones térmicas del medio (Arcos, 2013, pp. 4-5).

3.5.1.3 Calor de hidratación

Para determinar el calor de hidratación se realizaron análisis en muestras de hormigón convencional y hormigón con 5, 10 y 15 % de sustitución de catalizador

agotado. No se analizó las muestras con 20 % de sustitución ya que los resultados de las pruebas de esfuerzo a la compresión muestran que a este porcentaje no se consigue un hormigón apto para ser utilizado en construcciones. En la Tabla 3.20 se exponen los resultados de los ensayos de determinación del calor de hidratación.

Tabla 3.20. Calor de hidratación de hormigón convencional y hormigón con adición de catalizador agotado

Muestra	Hormigón convencional	Hormigón con varios porcentajes de adición de catalizador agotado		
		5 %	10 %	15 %
Calor de hidratación (kJ/kg)	334,1	362,4	406,0	444,3

Según la norma INEN 490 el valor máximo de calor de hidratación que el cemento portland puzolánico debe alcanzar a los 7 días es de 290 kJ/kg. En este caso los valores de calor de hidratación de todas las muestras excedieron el límite establecido ya que los ensayos no fueron realizados en un calorímetro que cumplía con todas las especificaciones de la norma INEN 199 “Cemento Hidráulico. Determinación del calor de hidratación”.

Se pudo observar en las muestras la misma tendencia reportada por otros estudios, el calor de hidratación se incrementa con la inclusión de catalizador agotado como puzolana. El calor de hidratación aumenta de forma proporcional al incremento de cantidad de catalizador agotado adicionada a las muestras. Este incremento se debe a la alta reactividad que presenta el catalizador agotado, la cual también es responsable de que el tiempo de fraguado sea más corto (Trochez, Torres, y Mejía, 2010, pp. 31-33).

Un incremento en el calor de hidratación del cemento puede tener efectos negativos en el rendimiento de hormigón y mortero cuando son fabricados en grandes cantidades. El calor se disipa muy lento dentro de las estructuras de hormigón y mortero y su acumulación puede causar diferenciales de temperatura excesivos que a su vez provocan cambios de volumen y agrietamientos. Por lo tanto, el hormigón adicionado con catalizador agotado no es apto para ser

utilizado en estructuras de hormigón masivo como es el caso de puentes y represas (García, Sánchez y Frías, 2007, pp. 443-447).

3.5.1.4 Requerimiento de agua

La dosis de agua que se requiere en las mezclas de hormigón se obtiene de la Tabla AIII.4, utilizada para calcular la dosificación del hormigón. Se calculó que la cantidad de agua requerida es de 193 dm^3 por cada m^3 de hormigón. En el Anexo III se especifica el procedimiento para calcular este valor.

A partir de la Tabla AIII5 se determinó la relación agua/cemento con base en el valor de resistencia a la compresión del hormigón, que para este proyecto fue de 210 kg/cm^2 sin inclusión de aire, por lo tanto, el valor de la relación agua/cemento fue de 0,623 litros de agua por cada kilogramo de cemento (American Concrete Institute, 2014, p. 9).

3.5.2 RESULTADOS DE ENSAYOS EN HORMIGÓN ENDURECIDO

3.5.2.1 Resistencia a la compresión

Los resultados de las pruebas de esfuerzo a la compresión realizados a las muestras de hormigón convencional y con adición de catalizador agotado se muestran en la Tabla 3.21. El hormigón que se desea producir en este proyecto no requiere de una resistencia a la compresión superior a 210 kg/cm^2 . Con el paso del tiempo, la resistencia a la compresión del hormigón aumenta, su valor debe cumplir para cada edad de curado con un porcentaje del valor final que debe llegar a 210 kg/cm^2 después de 28 días. Esto significa que cuando el hormigón cumpla 3 días de haber sido curado el valor de su resistencia debe ser alrededor del 40 % del que tendría a los 28 días, es decir, el 40 % de 210 kg/cm^2 que es igual a 84 kg/cm^2 . Estos porcentajes se presentan en la Tabla 3.22 (Valcuende et al., 2013, p. 3).

Tabla 3.21. Resistencia a la compresión

Resistencia en kg/cm²				
Muestra de hormigón	Tiempo de curado (días)			
	3	7	14	28
Convencional	75,28	132,47	190,36	208,37
Adición de 5 %	79,09	135,49	186,33	208,21
Adición de 10 %	65,85	126,31	183,91	207,98
Adición de 15 %	55,80	74,94	110,08	149,00
Adición de 20 %	48,70	58,59	87,43	114,79

Tabla 3.22. Desarrollo de la resistencia a la compresión del hormigón con el tiempo

Tiempo de curado (Días)	3	7	14	28
Porcentaje de desarrollo aproximado	40	65	90	99
Resistencia a la compresión (kg/cm²)	84,0	136,5	189,0	207,9

(Valcuende et al., 2013, p. 3)

En la Tabla 3.23 se indica el desarrollo del esfuerzo de compresión de las muestras de hormigón convencional y adicionado con catalizador agotado. Los resultados muestran que si se reemplaza 15 % ó 20 % de cemento por catalizador agotado, el hormigón no satisface los requisitos ya que no alcanza los porcentajes de esfuerzo de compresión especificados para cada tiempo de curado.

Tabla 3.23. Desarrollo de la resistencia a la compresión de las muestras ensayadas

Porcentaje en relación a 210 kg/cm²				
Muestra de hormigón	Tiempo de curado (días)			
	3	7	14	28
Convencional	35,85	63,08	90,65	99,23
Adición de 5 %	37,66	64,52	88,73	99,15
Adición de 10 %	31,36	60,15	87,58	99,04
Adición de 15 %	26,57	35,69	52,42	70,95
Adición de 20 %	23,19	27,90	41,63	54,66

Los especímenes de hormigón con sustitución de 5 % de cemento por catalizador agotado presentaron valores cercanos al valor deseado para los tiempos de

curado de 3, 7 y 14 días y cumplen el requisito establecido para los 28 días de curado. Los especímenes preparados con hormigón adicionado con 10 % de catalizador agotado no cumplen con las especificaciones a los tiempos de curado de 3 y 7 días. Sin embargo, a los 14 días de curado su resistencia aumenta y es más cercana a la deseada y a los 28 días de curado alcanza un valor adecuado para hormigón de resistencia a la compresión de 210 kg/cm².

3.5.2.2 Expansión y contracción en autoclave

Los resultados de los ensayos de expansión en autoclave para las muestras de hormigón se exhiben en la Tabla 3.24. El porcentaje máximo de expansión permitido es de 0,8 % y el porcentaje máximo de contracción es de 0,2 %, de acuerdo con la norma INEN 490.

Tabla 3.24. Resultados de expansión en autoclave

Muestra	Hormigón convencional	Hormigón con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
Expansión en autoclave (%)	0,352	0,342	0,300	0,246	0,188

Los resultados muestran que el porcentaje de expansión en autoclave del hormigón convencional sin adición puzolánica fue de 0,352 % y cumple con el límite establecido por la norma. Para las muestras de hormigón adicionadas con catalizador agotado, se observa que el porcentaje de expansión en autoclave se reduce cuando se incrementa la cantidad de catalizador incluida en la mezcla.

La reducción en el porcentaje de expansión de las muestras de hormigón que incluyen catalizador agotado en su composición se debe a que la cantidad de óxido de magnesio y óxido de calcio presente es menor. Estos óxidos son los responsables de la expansión del hormigón al ser hidratado. El óxido de calcio corresponde a la cal que no se ha combinado con los constituyentes del cemento durante el proceso de fabricación y se conoce como cal libre. El óxido de

magnesio, proveniente del carbonato de calcio que forma parte de la composición de la piedra caliza, el cual se separa en óxido de magnesio y dióxido de carbono, está presente en el cemento portland debido a que no se combina con el resto de constituyentes del cemento (Al-Attar, 2013, pp. 111-113).

No existe un límite establecido por las normas para el porcentaje de cal libre máximo presente en la composición final del cemento, sin embargo, a partir de datos experimentales se han determinado que el porcentaje de cal libre óptimo es de 1 % ya que es poco viable conseguir que la cal reaccione en su totalidad durante la producción de clínker de cemento portland (Gomá, 2009, 96-97).

Al agregar catalizador agotado a la mezcla de hormigón se reduce la proporción de los óxidos de magnesio y de calcio en relación al total de la mezcla, esto provoca un efecto de dilución que resulta en la disminución del porcentaje de expansión del hormigón a medida que aumenta la masa de catalizador dentro de la mezcla total. La inclusión de catalizador agotado en la mezcla permitió conseguir hormigón que es menos propenso a agrietamientos que el hormigón convencional cuando son sometidos a altas temperaturas o al finalizar su proceso de hidratación (Morales, 2012, pp. 2-3).

3.5.2.3 Test de lixiviación TCLP

En la Tabla 3.25 se exponen los resultados del test de lixiviación TCLP para las probetas de hormigón con 5, 10 y 15 % de sustitución de catalizador agotado. Estos resultados fueron comparados con los valores máximos permisibles para analizar si un desecho es o no tóxico establecidos en las normativas de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, los cuales coinciden con los valores especificados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Estas normativas fueron utilizadas en vista de la ausencia de regulaciones vigentes para la localidad de Apuela, lugar donde se desea colocar la planta de producción de cemento portland puzolánico y hormigón elaborado

con este material. Las consideraciones para seleccionar esta ubicación se describen en la sección 3.6.3.

Los resultados muestran que todos los metales analizados en el test de lixiviación TCLP están presentes en los lixiviados de las muestras de hormigón con sustitución de 5, 10 y 15 % en concentraciones menores a los valores máximos permisibles, especialmente los metales arsénico, mercurio y selenio, cuya concentración es tan baja que incluso se encuentra por debajo del límite de detección del espectrofotómetro de absorción atómica AAnalyst 300 marca Perkin Elmer. A partir de estos resultados se puede concluir que el uso de catalizador agotado como adición puzolánica, a pesar de ser un desecho de la industria del petróleo que es altamente contaminante, no representa riesgo ambiental alguno como se ha demostrado en estudios anteriores (Trochez, Torres y Mejía, 2012, pp. 148-151).

Tabla 3.25. Resultados del test de lixiviación TCLP

Elemento	Límite máximo permisible (mg/L)	Hormigón con diferentes porcentajes de sustitución de catalizador agotado		
		5 %	10 %	15 %
Arsénico (ug/L)	5,00	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Bario (mg/L)	100,00	0,10	0,10	0,15
Cadmio (mg/L)	1,00	0,04	0,04	0,05
Cromo (mg/L)	5,00	0,62	0,36	0,15
Mercurio (ug/L)	0,20	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Níquel (mg/L)	2,00	0,25	0,33	0,39
Plata (mg/L)	5,00	0,01	0,02	0,02
Plomo (mg/L)	5,00	0,35	0,62	0,62
Selenio (ug/L)	1,00	< 0,10	< 0,10	< 0,10

(Secretaría de Ambiente, 2014, pp. 70-71; EPA, 1992, pp. 17-18)

Se puede observar que la concentración de cromo incrementa a medida que se disminuye el porcentaje de catalizador que sustituye al cemento en las mezclas de hormigón. Esto se debe a que el cromo es una impureza que está presente en el cemento que proviene de las materias primas empleadas en la producción de

clínker de cemento o del material del que están fabricados los hornos y molinos utilizados en el proceso, que tienen aproximadamente 15 % de cromo en su composición (Balarezo, 2013, p. 7).

3.5.3 RESULTADOS DE ENSAYOS EN MORTERO

3.5.3.1 Contenido de aire en el mortero

En la Tabla 3.26 se muestran los resultados de los ensayos de contenido de aire en el mortero.

Tabla 3.26. Contenido de aire de mortero estándar y mortero con adición de catalizador agotado

Muestra	Mortero estándar	Mortero con varios porcentajes de adición de catalizador agotado			
		5 %	10 %	15 %	20 %
Contenido de aire (%)	1,4	1,4	1,5	1,7	1,8

El contenido de aire del mortero sin adición de catalizador agotado o mortero estándar fue de 1,4 %, y cumple con el requisito de no ser mayor a 1,5 %. Los morteros adicionados con catalizador agotado presentaron porcentajes de contenido de aire mayores al del mortero estándar. Los morteros que fueron sustituidos con 5 y 10 % de catalizador agotado cumplen con el requisito ya que sus porcentajes de contenido de aire fueron de 1,4 y 1,5 % respectivamente. Los morteros cuyos porcentajes de sustitución fueron de 15 y 20 % presentan un valor de porcentaje de aire mayor al requerido: 1,7 y 1,8 % respectivamente.

Los morteros con adición de catalizador agotado presentan porcentajes de contenido de aire mayores al de mortero sin adición pero no llegan a ser tan altos como los valores presentados por las muestras de hormigón con adición de catalizador. Esto se debe a que el hormigón es elaborado con agregado grueso, el cual contribuye a la generación de espacios vacíos donde el aire puede acumularse. En el caso de los morteros, que no cuentan con agregado grueso en

su composición, la diferencia entre la finura del catalizador y la finura del cemento ejerce mayor influencia sobre el porcentaje de contenido de aire.

Al sustituir el cemento por un material de una finura diferente se generan espacios donde se acumula el aire, por esta razón se redujo el tamaño del catalizador hasta alcanzar un tamaño de partícula igual al del cemento, lo cual permitió obtener morteros adicionados que presentaron porcentajes de contenido de aire similares o superiores a los del mortero estándar. El aumento del contenido de aire en los morteros que fueron sustituidos con catalizador agotado presenta ventajas debido a que evita fisuras provocadas por cambios en las condiciones climáticas, reduce el requerimiento de agua y aumenta la cohesividad de la mezcla reduciendo el desperdicio durante su aplicación (Žvionaitė et al., 2011, p. 76).

3.5.3.2 Índice de actividad puzolánica

La dosificación para mortero estándar y mortero con adición para este ensayo se establece en la norma INEN 496. El cálculo de la cantidad de catalizador que sustituye al cemento se detalla en el Anexo IV. En la Tabla 3.27 se presentan las dosificaciones para cada caso.

Tabla 3.27. Dosificación de morteros para determinación del índice de actividad puzolánica del catalizador agotado

Componentes	Mortero estándar	Mortero con reemplazo de catalizador
	Peso (g)	
Cemento	500,00	325,00
Agregado fino	1 500,00	1 500,00
Agua	250,00	250,00
Catalizador agotado	---	158,60

Los resultados de las pruebas de actividad puzolánica se muestran en la Tabla 3.28. El índice de actividad puzolánica del catalizador agotado presentó un valor

de 86,61 %, aunque este valor es menor que el valor de 92 % de actividad puzolánica que se ha reportado en otros estudios, si cumple con el requerimiento de la INEN 494 ya que ésta establece que su valor debe ser mayor a 75 %. Esto demuestra que el catalizador agotado es un material apto para utilizarse como adición puzolánica en mezclas de hormigón y mortero (Torres, Baquero y Silva, 2009, pp. 2-5).

Tabla 3.28. Índice de actividad puzolánica

Parámetro	Valor	Unidad
Promedio resistencia la compresión de mortero estándar	134,72	kg/cm ²
Promedio resistencia la compresión de muestras con reemplazo de catalizador	116,68	kg/cm ²
Índice de actividad puzolánica	86,61	%

Las propiedades puzolánicas que posee el catalizador agotado se deben a su composición química, ya que es un material constituido principalmente por silicio y aluminio. Adicionalmente, se ha demostrado que el catalizador FCC agotado tiene un comportamiento puzolánico muy elevado debido a su capacidad de fijar grandes cantidades de Ca(OH)₂ liberado durante la hidratación del cemento (Borrachero et al, 2014, p. 7).

El catalizador FCC agotado contiene impurezas de hidrocarburos en su estructura, el contenido de estas impurezas en los materiales puzolánicos es medido indirectamente a través del porcentaje de pérdidas por calcinación. El porcentaje calculado por Barrera (2015) es de 6,2 % y cumple con la norma INEN 494 que establece que este valor no debe ser superior a 10 % (p. 64). Realizar una calcinación previa mejora las propiedades puzolánicas del catalizador, lo cual permite alcanzar resistencias superiores a las de muestras de mortero estándar u hormigón convencional. Estas mejoras también pueden ser alcanzadas reduciendo el catalizador hasta el tamaño de partícula del cemento. La acción combinada de estos dos tratamientos previos puede ser útil para lograr incorporar una mayor cantidad de catalizador a las mezclas de hormigón y mortero (Tseng, Huang y Hsu, 2004, pp. 3-6).

3.5.3.3 Expansión en mortero

Los resultados de los ensayos de expansión en autoclave para las muestras de mortero se presentan en la Tabla 3.29. De acuerdo a la INEN 490, el porcentaje máximo de expansión permitido para en morteros después de haber sido curados durante 14 días es de 0,02 %.

Tabla 3.29. Expansión en mortero estándar y mortero con sustitución de catalizador agotado

Muestra	Mortero estándar	Mortero con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
Expansión en autoclave (%)	0,018	0,018	0,017	0,015	0,013

El mortero sin adición de catalizador agotado presentó un valor de expansión de 0,018 %, el cual cumple con el requisito de la norma INEN 490. El mortero con adición de catalizador de 5 % presentó un valor igual al del mortero sin adición. Para los porcentajes de sustitución de 10, 15 y 20 % se puede observar que el porcentaje de expansión luego del proceso de autoclave disminuye a medida que se aumenta la cantidad de catalizador incluida en el mortero. Las razones para esta disminución son las mismas expuestas en la sección 3.5.2.2.

3.5.3.4 Contracción por secado

Los resultados de los ensayos de contracción por secado para las muestras de mortero estándar y mortero adicionado con catalizador agotado se muestran en la Tabla 3.30 y se expresan como porcentaje de contracción con respecto a la longitud inicial para cada edad de curado. La norma INEN 490 establece que las muestras de mortero no deben contraerse más de 0,15 % por efecto del aire circulante dentro de la cámara de curado después de un período de curado de 60 días. La muestra de mortero estándar cumple con este requisito, su porcentaje de contracción fue de 0,14 % para el período de curado de 60 días. Las muestras de mortero adicionados con catalizador presentaron un porcentaje de contracción

menor al del mortero estándar desde los 7 días de curado. Al final del período de 60 días de curado, todas las muestras de mortero adicionado presentaron el mismo porcentaje de contracción: 0,12 %; y cumplieron con el requisito de contraerse no más de 0,15 % establecido por la norma INEN 490.

Tabla 3.30. Contracción por secado

Contracción por secado (%)				
Tipo de Mortero	Edad de curado (días)			
	7	14	28	60
Estándar	0,07	0,08	0,13	0,14
5 %	0,06	0,08	0,11	0,12
10 %	0,05	0,08	0,11	0,12
15 %	0,04	0,05	0,09	0,12
20 %	0,02	0,05	0,09	0,12

La reducción en el porcentaje de contracción por secado presentada por los morteros adicionados con catalizador agotado se debe a que en la hidratación del cemento, los componentes formados se ubican dentro de los poros del catalizador. Esto provoca que la estructura del mortero sea más densa que la de un mortero convencional sin adición y presente menos variación en su longitud provocada por factores externos (Grigaliūnas y Rudžionis, 2014, pp. 37-38).

3.5.3.5 Resistencia a los sulfatos

Los resultados de las pruebas de resistencia a los sulfatos para las probetas de mortero estándar y mortero adicionado con catalizador se exponen en la Tabla 3.31. Para cada edad de curado los resultados se expresan como porcentaje de expansión con respecto a la longitud inicial. La norma INEN 490 establece que una muestra de mortero sometida al ataque de una solución de sulfato de sodio debe presentar una expansión de máximo 0,10 % al ser ensayada después de un período de curado de 60 días. El mortero patrón no cumple con este requisito ya que fue elaborado con cemento hidráulico Holcim para construcción en general

tipo GU, el cual está diseñado para estructuras en condiciones normales y no es resistente al ataque de sulfatos.

Tabla 3.31. Resistencia a los sulfatos

Resistencia a los sulfatos (%)				
Tipo de Mortero	Edad de curado (días)			
	7	14	28	60
Estándar	0,06	0,08	0,12	0,13
5 %	0,06	0,08	0,09	0,12
10 %	0,05	0,07	0,10	0,12
15 %	0,04	0,06	0,09	0,11
20 %	0,04	0,06	0,08	0,09

Las muestras adicionadas con catalizador agotado incrementaron la resistencia del mortero al ataque de sulfatos. El incremento en la resistencia es evidente en todos los porcentajes de sustitución, sin embargo, el único porcentaje de sustitución que mejora la resistencia hasta un valor que cumple con el requisito establecido por la norma INEN 490 es el de 20 %, el cual presenta una expansión de 0,09 % después de 60 días de resistir al ataque de la solución de sulfato de sodio. Los morteros adicionados con catalizador agotado son más resistentes al ataque la solución de sulfato de sodio y otros agentes químicos ya que su permeabilidad se reduce debido a que en los poros del catalizador agotado se ubican productos formados por las reacciones puzolánicas que ocurren durante la hidratación del cemento (Borrachero et al., 2014, pp. 60-65).

3.6 DISEÑO DE LA PLANTA

3.6.1 CAPACIDAD DE LA PLANTA

Se desarrolló la ingeniería básica de una planta con capacidad de 300 sacos de 50 kg de cemento portland puzolánico por día, ya que se dispone de 1 500 kg de catalizador que son desechados diariamente por la Refinería Esmeraldas. La

capacidad de la planta se calculó a partir de la información proporcionada por Cervantes (2009) quien determinó que la Refinería Esmeraldas desecha 1 500 kg de catalizador agotado diariamente. Debido a que el mejor porcentaje de sustitución de catalizador agotado por cemento fue de 10 %, se calculó que el total de cemento portland puzolánico que se puede producir en la planta fue de 15 000 kg por día (p. 52).

$$\frac{1\,500\text{ kg de catalizador agotado}}{\text{día}} \times \frac{100}{10} = 15\,000\text{ kg de cemento portland puzolánico / día}$$

$$15\,000\text{ kg de cemento portland puzolánico / día} \times \frac{1\text{ saco}}{50\text{ kg}} = 300\text{ sacos de cemento portland puzolánico / día}$$

La composición del cemento portland puzolánico calculada para este proyecto, se expone en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32. Composición del cemento portland puzolánico

Material	Cantidad	Unidad
Catalizador FCC agotado	1 500	kg/día
Cemento portland sin adición puzolánica	13 500	kg/día
Total cemento portland puzolánico	15 000	kg/día

Con base en la cantidad de cemento portland puzolánico calculada para el presente proyecto y siguiendo la dosificación especificada en la sección 3.4.1, se determinó las cantidades de agregado fino y agregado grueso necesarias para producir hormigón con el tipo de cemento antes mencionado.

Tabla 3.33. Cantidad de agregados fino y grueso para producir hormigón de cemento portland puzolánico

Material	Relación en peso	Cantidad (kg)
Cemento portland puzolánico	1,00	15 000,00
Agregado grueso	3,07	46 046,75
Agregado fino	2,34	35 044,76

3.6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

La caliza que se extrae de la cantera es llevada a la trituradora T-101 para reducir su tamaño hasta 25 mm, se utiliza el tamiz S-101 para permitir el paso directo del material menor a 25 mm al molino de bolas M-101, donde se realiza una segunda reducción de tamaño de la caliza hasta 90 micras y también se reduce el tamaño de arcilla y mineral de hierro necesarios para alcanzar la composición deseada de cemento portland. En esta etapa del proceso se obtiene un polvo muy fino conocido como harina cruda o crudo, el cual ingresa al precalentador HE-101 que eleva su temperatura hasta 800 °C y realiza una calcinación parcial. Después del precalentamiento, la harina cruda experimenta una transformación físico-química en el horno rotatorio F-101, dentro del cual se llevan a cabo las reacciones necesarias para la obtención de clínker que tienen lugar a 1 450 °C. Para asegurar el estado vítreo del clínker se disminuye su temperatura hasta 150 °C en el enfriador HE-102. Posteriormente, se reduce el tamaño del clínker junto con el catalizador agotado y yeso hasta 45 micras en el molino de bolas M-102, con lo cual se obtiene cemento portland puzolánico (Deolalkar, 2009, pp. 6-140).

Finalmente, se reduce el tamaño de rocas extraídas de la cantera hasta 1 pulgada en la trituradora T-201 para producir agregado grueso y hasta 4,75 mm en el molino de bolas M-201 para producir agregado fino, los cuales son almacenados en los silos TK-202 y TK-203 respectivamente. El cemento portland puzolánico y los agregados fino y grueso son transportados en camiones mixer hacia los sitios donde se requiera elaborar estructuras de hormigón. Los materiales son pesados dependiendo de la cantidad requerida para cada obra y manteniendo la dosificación especificada en la sección 3.4.1 para elaborar hormigón de cemento portland puzolánico (Holcim, 2011a, pp. 2-8).

3.6.3 LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

Para seleccionar el lugar donde se ubicará la planta de producción de cemento portland puzolánico y de hormigón elaborado con este material, se comparó

algunos aspectos como la disponibilidad de materia prima, disponibilidad de servicios industriales, facilidad de transporte y el clima. Los lugares que se consideraron para localizar la planta fueron la ciudad de Esmeraldas, el recinto San Antonio y la localidad Apuela.

En la ciudad de Esmeraldas se encuentra la Refinería Esmeraldas, la cual desecha 1 500 kg de catalizador agotado que servirán como materia prima para la planta. Dentro de la provincia también se puede encontrar arenas ferruginosas, las cuales aportan mineral de hierro a la composición del cemento portland, pero no existen yacimientos de piedra caliza que es la principal materia prima para producir cemento (Efe, 2014, p. 1).

El recinto San Antonio está ubicado en la provincia del Guayas en el kilómetro 78 vía a Playas. Cuenta con minas de caliza de pureza entre 96 y 99 % y dispone de servicios industriales necesarios para operar una planta, sin embargo, estas minas se encuentra a 8 horas de la ciudad de Esmeraldas, de donde se obtiene el catalizador agotado (Cedeño, Domínguez y Ortega, 2002, pp. 82-84).

La tercera opción analizada, Apuela, es una comunidad que pertenece a la parroquia de Íntag del cantón Cotacachi. En esta parroquia existen minas de las cuales se puede obtener caliza y arcilla ubicadas entre las localidades Plaza Gutiérrez y Asabí. La localidad de Apuela está ubicada cerca de estas minas y además cuenta con los servicios necesarios para operar una planta industrial. Se escogió Apuela como la mejor opción para ubicar la planta ya que resulta más práctico transportar el catalizador agotado y el mineral de hierro desde Esmeraldas hasta Apuela, en lugar de transportar piedra caliza y arcilla que se requiere en cantidades mucho mayores a las de las materias primas previamente mencionadas. El trayecto desde Esmeraldas hasta Apuela es de aproximadamente 5 horas y 30 minutos (Obando, 2005, pp. 27-28).

En la Tabla AV.2 del Anexo V se puede observar que el método cualitativo para la determinación de la localización de la planta favorece a Apuela como la mejor

opción con 91,5 %. Los valores para San Antonio y Esmeraldas son 81 y 85,5 % respectivamente. La ubicación de la localidad Apuela se presenta en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Localización de la planta de producción de cemento portland puzolánico

3.6.4 BALANCE DE MASA

Los números de cada corriente y los flujos másicos del proceso de producción de cemento portland puzolánico y de hormigón elaborado con este material se presentan en la Figura 3.6.

3.6.4.1 Molienda de clínker

El proceso de molienda del clínker que se muestra en la Figura 3.6 se realiza en el molino M-102, en el cual ingresan el clínker de cemento, yeso y catalizador agotado, con lo que se obtiene el cemento portland puzolánico. La capacidad de la planta es de 15 000 kg/día de cemento portland puzolánico, flujo que

corresponde a la corriente 9. El 10 % del cemento portland puzolánico está constituido por catalizador agotado, el cual ingresa por la corriente 11 con un flujo másico de 1 500 kg/día.

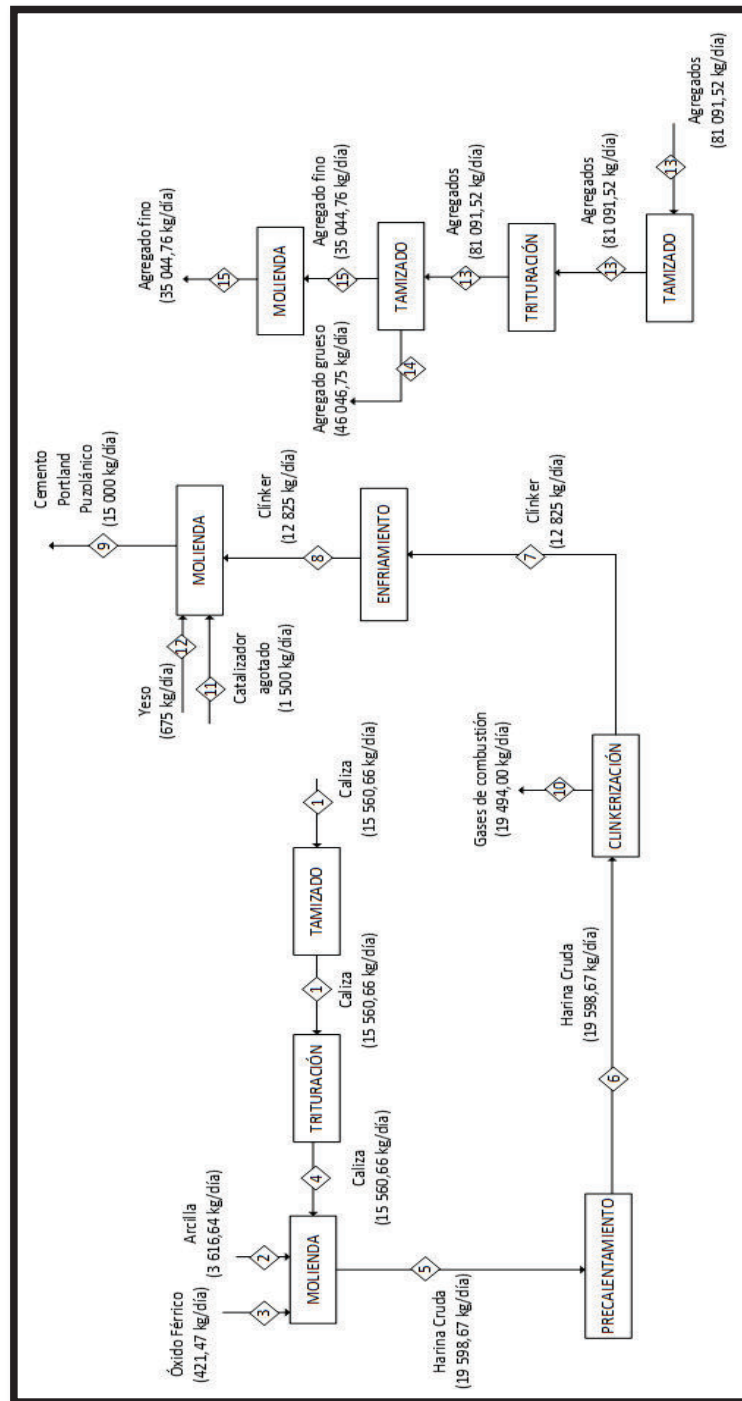


Figura 3.6. Balance de masa del proceso

Los 13 500 kg/día restantes corresponden a cemento portland sin adición puzolánica, el cual está constituido por 95 % de clínker y 5 % de yeso. Estos datos permiten calcular los valores de las corrientes 8 y 12.

$$\text{Corriente 9} = 15\,000 \text{ kg de cemento portland puzolánico/día}$$

$$\text{Corriente 11} = 1\,500 \text{ kg de catalizador FCC agotado/día}$$

$$\text{Corriente 8} = 0,95 \times 13\,500 = 12\,825 \text{ kg de clínker/día}$$

$$\text{Corriente 12} = 0,05 \times 13\,500 = 675 \text{ kg de yeso/día}$$

3.6.4.2 Enfriamiento de clínker

En el proceso de enfriamiento lo que se busca es bajar la temperatura del clínker desde 1 450 °C hasta 150 °C. En este proceso no hay transformación de materia ni se agrega aditivos o materiales correctores. Por lo que el valor de la corriente 7 es igual al de la corriente 8.

$$\text{Corriente 7} = \text{Corriente 8} = 12\,825 \text{ kg de clínker/día}$$

3.6.4.3 Clinkerización

El proceso de cocción de harina cruda también conocido como clinkerización se da dentro del horno rotatorio en el cual las materias primas son cocidas a 1 450 °C para formar clínker. Los cuatro compuestos principales del clínker son: alita, belita, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. La composición de 12 825 kg de clínker por día se presenta en la Tabla 3.34 (Holcim, 2011b, p. 3).

Las reacciones de formación del clínker ocurren en diferentes secciones del horno, que son identificadas de acuerdo a la temperatura. Estas secciones se ilustran en

la Figura AV.1. Las reacciones de cada sección se presentan en las ecuaciones [3.1] a [3.9] (Boateng, 2008, pp. 275-278).

Tabla 3.34. Composición de clínker producido

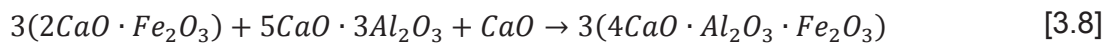
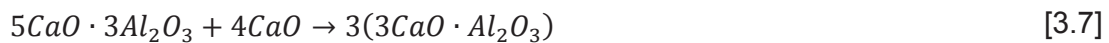
Compuesto	Composición	kg/día
Alita (C ₃ S)	0,62	7951,50
Belita (C ₂ S)	0,15	1923,75
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	0,1	1282,50
Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF)	0,1	1282,50
Cal libre	0,01	128,25
Comp. Min. (Mg, Na, K, S)	0,02	256,50

(Holcim, 2011b, p. 3)

Zona de descomposición (900°C)



Zona de transición (900-1300°C)



Zona de sinterización (1300-1400°C)



A partir de estas reacciones se realizaron los cálculos estequiométricos, presentados en el Anexo V, necesarios para determinar las cantidades de materia prima que deben ser alimentadas al horno para obtener clínker de cemento portland de la composición establecida en la Tabla 3.34. Las cantidades de reactivos necesarias, que se conoce como harina cruda y corresponde a la corriente 6, se muestran en la Tabla 3.35.

Tabla 3.35. Materia prima necesaria para la producción de clínker de cemento portland

Compuesto	kg/día
Carbonato de calcio	15 405,05
Óxido de aluminio	752,92
Óxido férrico	421,47
Óxido de silicio	2 762,73
Componentes minoritarios	256,50
Total harina cruda	19 598,67

Corriente 6 = 19 598,67 kg de harina cruda/día

Corriente 10 = 6 773,67 kg de CO₂/día

En el proceso de clinkerización se produce dióxido de carbono por la descomposición de carbonato de calcio y por el consumo de combustible del horno. Por cada kg de clínker producido se genera 1,52 kg de gases de chimenea. La composición de los gases de combustión, que son eliminados por la corriente 10, se exhibe en la Tabla 3.36 (Alsop, 2001, p. 247).

Tabla 3.36. Composición de gases de combustión a la salida del horno rotatorio

Gases de combustión	Porcentaje (%)	Flujo másico (kg/día)
CO ₂	35,4	6 900,88
H ₂ O	6	1 169,64
N ₂	58,6	11 423,48
Total	100	19 494,00

(Alsop, 2001, p. 247)

3.6.4.4 Precalentamiento de materia prima

La temperatura de la harina cruda es elevada desde la temperatura ambiente hasta 800 °C, con lo cual se elimina la humedad presente. La inclusión de este equipo permite utilizar un horno de menor tamaño del que sería necesario en el caso de no contar con esta etapa en el proceso. Las cantidades de las corrientes 5 y 6 son iguales ya que en esta etapa solo existe elevación de la temperatura.

$$\text{Corriente 5} = \text{Corriente 6} = 19\,598,67 \text{ kg de harina cruda/día}$$

3.6.4.5 Molienda de materia prima

En esta etapa se disminuye de tamaño la caliza, arcilla y mineral de hierro. Las cantidades de estos minerales son las determinadas en la sección 3.6.4.3. La corriente 2 corresponde a la cantidad de arcilla, que incluye a los óxidos de silicio y aluminio, la corriente 3 a mineral de hierro y la corriente 4 a caliza.

$$\text{Corriente 2} = 3\,616,64 \text{ kg de arcilla/día}$$

$$\text{Corriente 3} = 421,47 \text{ kg de óxido férrico/día}$$

$$\text{Corriente 4} = 15\,560,66 \text{ kg de caliza/día}$$

3.6.4.6 Trituración de caliza

Esta etapa es el paso inicial del proceso en el que se hace una trituración de la caliza proveniente de las canteras. La cantidad requerida en la corriente 1 es la misma que la determinada para la corriente 4.

$$\text{Corriente 1} = \text{Corriente 4} = 15\,560,66 \text{ kg de caliza/día}$$

3.6.5 BALANCE DE ENERGÍA

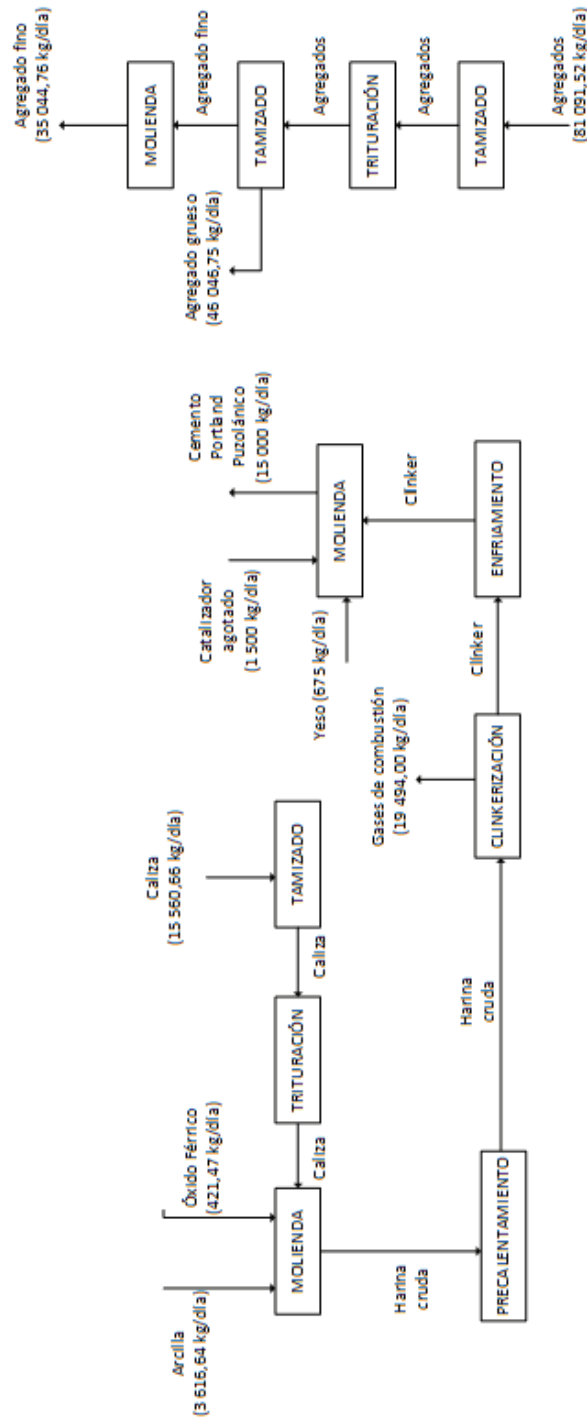
Los valores correspondientes al balance de energía del proceso se presentan en la Tabla 3.37 que fueron calculados de acuerdo al tiempo de operación y a la energía consumida por cada equipo que opera en la planta de producción de cemento portland puzolánico. La potencia de cada equipo fue obtenida de las hojas de especificaciones que se presentan de la Tabla AV.3 hasta la Tabla AV.7. El costo energético fue calculado considerando el precio de 0,08 centavos por kW-h que establece la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) para industrias que consumen más de 301 kW-h al mes (EEQ, 2014, p. 9).

Tabla 3.37. Balance de energía del proceso de producción de cemento portland puzolánico

Equipos	Unidad	Potencia (kW)	Tiempo de operación (h)	Consumo de energía (kW-h)
Trituradora	1	15,00	24,00	360,00
Molino de bolas	2	55,00	24,00	1 320,00
Pre calentador	1	7,50	24,00	180,00
Horno	1	18,50	24,00	444,00
Enfriador	1	7,50	24,00	180,00
Banda transportadora	1	5,00	24,00	120,00
Consumo energético por mes (kW-h/día)				2 604,00
Consumo energético anual (kW-h/año)				859 320,00
Costo energético anual (\$)				68 745,60

(EEQ, 2014, p. 9)

3.6.6 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO




 Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Química Y Agroindustria	
NOMBRE DEL PROYECTO: Planta de producción de cemento portland puzolánico y de hormigón elaborado de este material	
ELABORADO POR: Alex Mosquera	PÁGINAS 1 de 1 BFD
FECHA: Enero de 2016	

Figura 3.7. Diagrama de bloques del proceso

3.6.7 DIAGRAMA P&ID DEL PROCESO

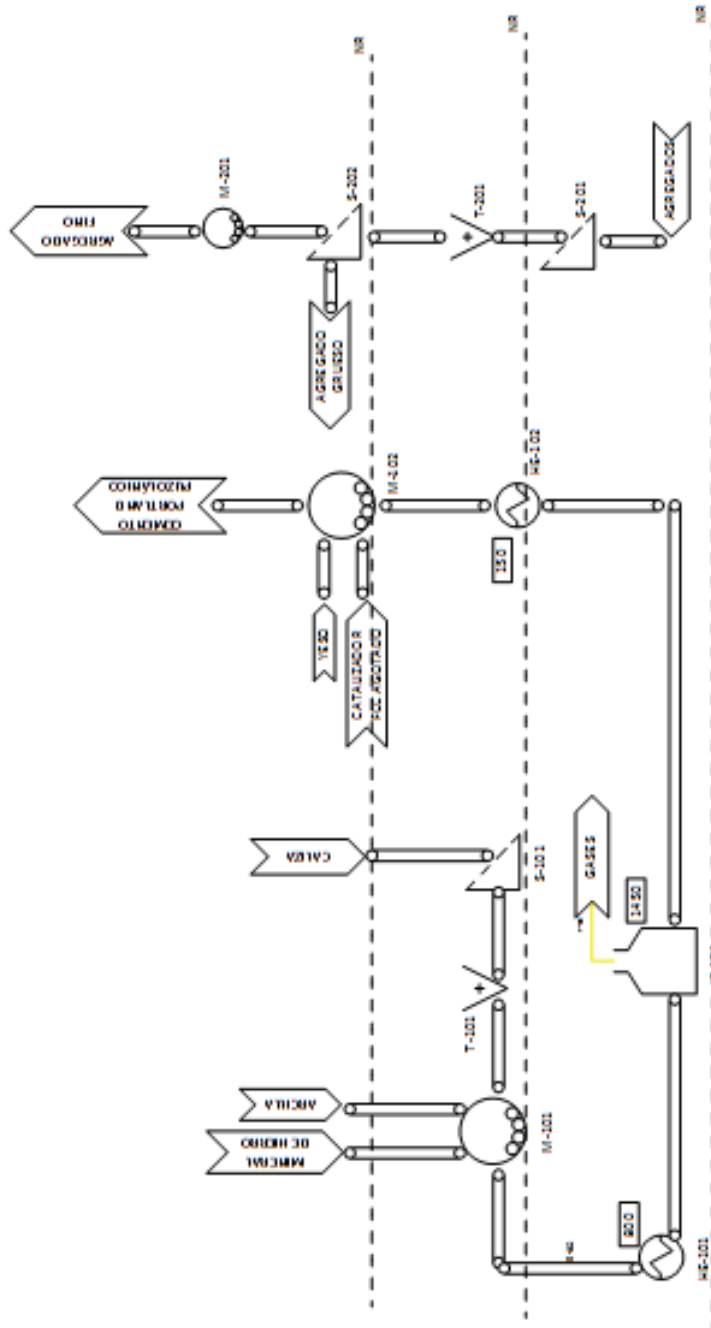

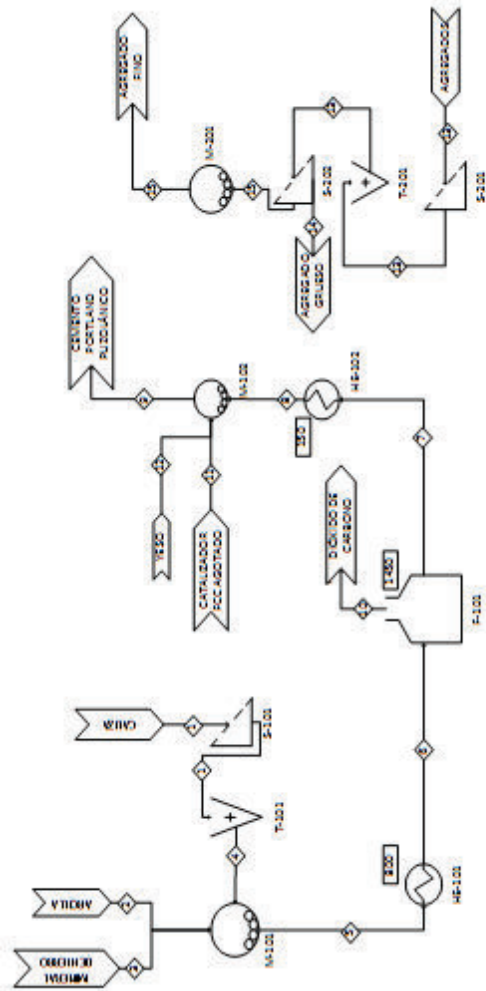


Figura 3.8. Diagrama de P&ID del proceso

 <p>Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Química Y Agroindustria</p>	<p>NOMBRE DEL PROYECTO: Planta de producción de cemento Portland puzolánico y de hormigón elaborado de este material</p>	
	<p>ELABORADO POR: Alex Mosquera</p>	<p>PÁGINAS 1 de 1 P&ID</p>
<p>FECHA: Enero de 2016</p>		

3.6.8 DIAGRAMA PFD DEL PROCESO



Numero de corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Estado	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Gas	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido
Presión (atm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25	800	1450	150	150	1450	25	25	25	25	25
Flujo másico (kg/día)	35560,66	3616,54	421,47	35560,66	39588,67	39588,67	12825,00	12825,00	15000,00	6773,67	15000,00	675,00	81092,51	46046,75	35044,76
Flujo másico de los componentes															
Carbonato de calcio	---	---	---	35405,05	35405,05	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Oxido de calcio	---	---	---	---	---	---	138,25	128,25	---	---	---	---	---	---	---
Dióxido de carbono	---	---	---	---	---	---	---	---	---	6773,67	---	---	---	---	---
Oxido de aluminio	---	752,92	---	---	752,92	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Oxido ferrico	---	421,47	---	421,47	421,47	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Oxido de silicio	---	2762,73	---	---	2762,73	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Alita	---	---	---	---	---	---	7961,50	7961,50	---	---	---	---	---	---	---
Betita	---	---	---	---	---	---	1923,75	1923,75	---	---	---	---	---	---	---
Aluminato tricálcico	---	---	---	---	---	---	1282,50	1282,50	---	---	---	---	---	---	---
Tetraaluminato	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Catalizador FCC	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Agua	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	15000,00	---	---	---	---
Yodo	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	675,00	---	---	---
Componentes minoritarios	155,61	100,89	---	155,61	256,50	256,50	256,50	256,50	---	---	---	---	---	---	---
Agregado grueso	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	46046,75	46046,75	---
Agregado fino	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	35044,76	35044,76	---

Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Química Y
Agricultura

NOMBRE DEL PROYECTO:
Planta de producción de cemento portland puzolánico y de
hormigón elaborado de este material

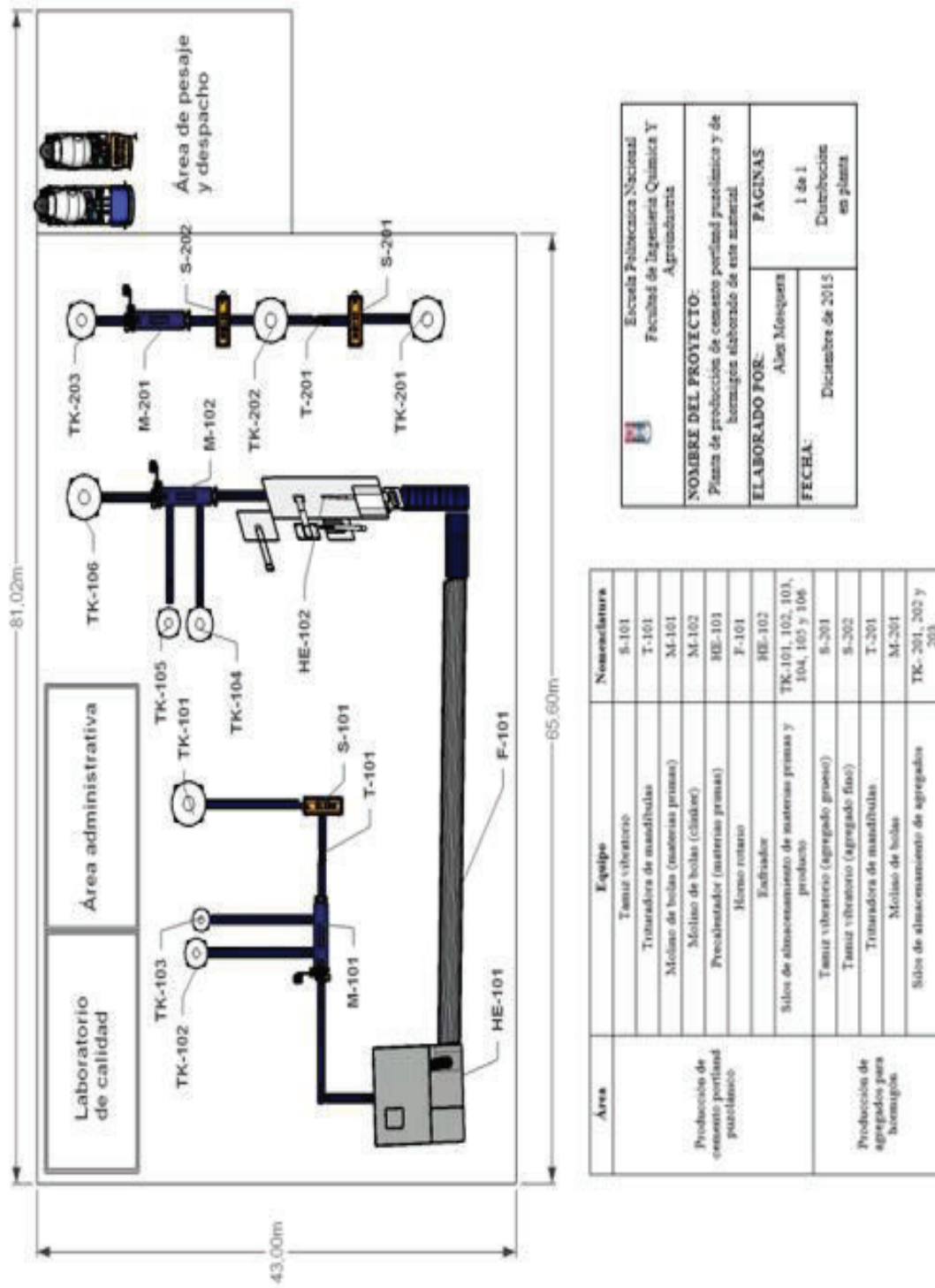
ELABORADO POR:
Alex Mosquera

FECHA:
Diciembre de 2015

PÁGINAS
1 de 1
PFD

Figura 3.9. Diagrama PFD del proceso

3.6.9 DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA



Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Química Y Agronomía	
NOMBRE DEL PROYECTO: Planta de producción de cemento portland puzolánico y de hormigón elaborado de este material	
ELABORADO POR: Alen Mesquita	PAGINAS 1 de 1
FECHA: Diciembre de 2015	Distribución en planta

Figura 3.10. Distribución de la planta de producción de cemento portland puzolánico y de hormigón elaborado de este material

3.6.10 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

En el proceso se tiene dos etapas de reducción de tamaño, en la primera se disminuye de tamaño la caliza que se utilizará para la producción de clínker, en la segunda es necesario disminuir de tamaño el clínker y los agregados para la producción de hormigón, por lo tanto se utilizan: tres tamices, dos trituradoras de mandíbulas y tres molinos de bolas. Los tamices se diseñaron calculando el área de tamizado, esto se obtuvo al dividir el flujo de alimentación para una constante. En la Tabla 3.38 se indican las constantes para el diseño de tamices.

Tabla 3.38. Constantes para el diseño de tamices

Abertura (mm)	0,8	2,3	9,5	25,4	88,9	139,7	177,8
Constante (t/ft²h)	0,5	1,1	3,2	5,5	10,0	14,8	18,0

(Backhurst, Harker y Richardson, 2002, p. 70)

La abertura que debe tener el tamiz que se usó en la primera etapa es de 25 mm, por lo tanto la constante es de 5,5 t/ft²h, el área de tamizado es de:

$$\text{Área de tamizado} = \frac{\text{Flujo de alimentación}}{\text{Constante}} \quad [3.10]$$

$$\text{Área de tamizado} = \frac{0,72 \frac{t}{h}}{5,5 \frac{t}{ft^2 h}} \quad [3.11]$$

$$\text{Área de tamizado} = 0,13 \text{ ft}^2 = 0,01 \text{ m}^2 \quad [3.12]$$

El mismo procedimiento fue realizado para diseñar los tamices S-201 y S-202, estos equipos se seleccionaron con base en el área de tamizado de catálogos proporcionados por la empresa McNichols, sus características se presentan en la Tabla 3.39 (McNichols, 2013, p. 1).

Las características del tamiz S-101 permiten que las piedras de caliza que se extraen de la cantera y cuyo tamaño es menor a 25 mm pasen directamente al

molino de bolas M-101. El tamiz S-201 permite que las rocas de tamaño menor a 1 pulgada pasen al silo TK-202, donde son almacenadas como agregado grueso. La fracción de este material que pasa por el tamiz S-202 se almacena como agregado fino en el silo TK-203

Las trituradoras de mandíbulas T-101 y T-201 se seleccionaron de catálogos de la empresa Retsch, con base en el tamaño de la materia prima a la entrada y salida de dichos equipos, cuyas características se presentan en la Tabla 3.40. La materia prima ingresa por la tolva cerrada y pasa a la cámara de trituración, la misma que es de forma cuneiforme. La trituración se lleva a cabo entre los brazos fijo y triturador que se mueven por un eje excéntrico. Si después de este proceso el tamaño de la materia prima disminuye, pasa a un recipiente para ser recolectado. La trituradora T-101 permite reducir el tamaño de la piedra caliza hasta 25 mm y la trituradora T-102 reduce el tamaño de las rocas extraídas de la cantera hasta 1 pulgada (Retsch, 2015, p. 1).

Tabla 3.39. Características de los tamices: S-101, S-201 y S-202

Material de construcción	Acero al carbono		
Nombre del equipo	S-101	S-201	S-202
Dimensiones (Longitud x ancho x altura) [m]	1,2 x 3,5 x 1,5	1,2 x 3,7 x 1,5	1,2 x 4 x 1,5
Área de trabajo (m ²)	0,01	0,03	0,06
Abertura de la malla (mm)	25	25,4	4,7
Potencia (kW)	5	7,5	10

(McNichols, 2013, p. 1)

Tabla 3.40. Características de la trituradora de mandíbulas

Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304	
Nombre del equipo	T-101	T-201
Capacidad (t/h)	1 – 3	10
Abertura de alimentación (mm)	200	210
Rango de descarga (mm)	10 – 40	20 – 40
Dimensiones (Longitud x ancho x altura) [m]	0,7 x 0,6 x 0,8	1,2 x 1,3 x 1,2
Potencia (kW)	5,5	15

(Retsch, 2015, p. 1)

En el precalentamiento de las materias primas se utilizó un precalentador que se escogió de catálogos de la empresa Metso con base en su capacidad. En la Tabla 3.41 se exponen las características del equipo. La clinkerización se lleva a cabo en un horno rotatorio cuyas características se presentan en la Tabla 3.42, la materia prima se introduce por la cola del horno, a través de una rampa, en la cámara de gas. La carcasa del horno se inclina y gira levemente, el material se mueve a lo largo de ésta. El calor es transferido a la materia prima por radiación del flujo de aire caliente (Metso, 2015, p. 1; Henan Zhengzhou, 2015, pp. 1-4).

Después de esta etapa es necesario disminuir la temperatura del producto obtenido hasta 150 °C, para lo cual se utiliza enfriador, sus características se presentan en la Tabla 3.43. El horno y el enfriador se seleccionaron de catálogos proporcionados por la empresa Henan Zhengzhou de acuerdo a su capacidad (Henan Zhengzhou, 2015, pp. 1-4).

Tabla 3.41. Características del precalentador

Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304
Nombre del equipo	HE-101
Capacidad (t/h)	1,5
Diámetro (m)	2,5
Altura (m)	20
Temperatura de calcinación (° C)	800
Potencia (kW)	55

(Metso, 2015, p. 1)

Tabla 3.42. Características del horno rotatorio

Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304
Nombre del equipo	F-101
Capacidad (t/h)	2
Diámetro (m)	1,6
Altura (m)	32
Temperatura de clinkerización (° C)	1450
Potencia (kW)	18,5

(Henan Zhengzhou, 2015, pp. 1-4)

Tabla 3.43. Características del enfriador

Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304
Nombre del equipo	HE-102
Capacidad (t/h)	2
Diámetro (m)	1
Longitud (m)	15
Volumen (m ³)	12
Velocidad (rpm)	5
Temperatura (° C)	150
Potencia (kW)	7,5

(Henan Zhengzhou, 2015, pp. 1-4)

Las dimensiones de los molinos de bolas se determinaron usando la ecuación [3.13] (Duda, 2003, p.80).

$$P = 8,44 \times D^{2,5} \times L \times K_L \times K_{SP} \times K_{MT} \text{ (kW)} \quad [3.13]$$

Donde:

P = potencia

L = longitud

D = diámetro

K_L = coeficiente de carga

K_{SP} = coeficiente de velocidad

K_{MT} = coeficiente de tipo de molino

Los factores de velocidad, carga y tipo de molino se encuentran en bibliografía, la potencia se puede calcular mediante la ecuación de Bond que corresponde a la expresión [3.14], el índice de Bond para la caliza es de 10,2 kWh/t (Duda, 2003, pp. 81- 85).

$$E = -10 W_i \times \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - \frac{1}{\sqrt{p}} \right) \quad [3.14]$$

Donde:

W_i = índice de Bond

$p = d_{80}$ de material descargado

$f = d_{80}$ de material alimentado

La caliza ingresa al molino de bolas M-101 con un tamaño de 25 mm y sale del mismo con un tamaño de 90 μ m, con estos datos se calcula la potencia del molino:

$$E = 10,2 \frac{kWh}{t} \times \left(\frac{10}{\sqrt{90}} - \frac{10}{\sqrt{25000}} \right) = 10,1 \frac{kWh}{st} \quad [3.15]$$

$$Potencia = E \times flujo = 10,1 \frac{kWh}{t} \times 0,72 \frac{t}{h} = 7,5 kW \quad [3.16]$$

Una práctica común es trabajar con una relación longitud-diámetro de 1,5 (Duda, 2003, p. 82). Reemplazando el valor de la potencia en la ecuación [3.13] se tiene:

$$\frac{P \times 1,5}{8,44 \times K_L \times K_{SP} \times K_{MT}} = D^{3,5}$$

$$\frac{7,5 \times 1,5}{8,44 \times 4 \times 0,21 \times 1,08} = D^{3,5}$$

$$D = 1,15 m$$

$$L = 1,5 * D$$

$$L = 1,5 * 1,15 = 1,7 m$$

Los molinos M-102 y M-201, que se utilizan para reducir el tamaño del clínker y del agregado fino respectivamente, se diseñaron siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el molino M-101, con los valores calculados se

escogieron los equipos de la empresa Zenith. Las características se presentan en la Tabla 3.44. Las materias primas a moler se trituran en la pista giratoria de molienda. La molienda se realiza por la aplicación de una fuerza de compresión, con una fuerza de cizallamiento, este efecto se produce gracias al contacto entre las bolas y las paredes del molino (Zenith, 2015, p. 1).

Tabla 3.44. Características de los molinos de bolas

Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304		
Nombre del equipo	M-101	M-102	M-201
Capacidad (t/h)	1,4 – 30	1 – 20	1,4 – 30
Diámetro (m)	1,2	1	1,5
Longitud (m)	1,7	1,5	2,2
Abertura de alimentación (mm)	25	35	30
Rango de descarga (μm)	20 – 70	20 – 50	4700
Velocidad (rpm)	30	30	30
Potencia (kW)	55	35	55

(Zenith, 2015, p. 1)

3.6.11 REQUERIMIENTO DE SERVICIOS

Los valores que corresponden a la cantidad y costo de los servicios industriales que se requieren para la operación anual de la planta se presentan en la Tabla 3.45. Estos servicios son: agua, que es necesaria para la operación de molinos de bolas y limpieza de equipos y energía eléctrica, que es necesaria para la operación de todos los equipos.

Tabla 3.45. Requerimiento de servicios industriales para el proceso de producción de cemento portland puzolánico

Requerimiento industrial	Cantidad por año	Costo (\$)	Costo anual (\$)
Agua (m^3)	3 829,75	0,550	2 106,363
Energía Eléctrica (kW-h)	859 320,00	0,080	68 745,600
		Total	70 851,963

(EEQ, 2014, p. 9)

(EPMAPS, 2015, p. 5)

3.7 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO CON CATALIZADOR AGOTADO DE LA UNIDAD FCC

3.7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO CON ADICIÓN DE CATALIZADOR AGOTADO

El análisis económico del proyecto fue realizado con base en los resultados del diseño de la planta presentados en la sección 3.6, en la cual se detalla el proceso de producción de 300 sacos de cemento portland puzolánico por día y hormigón elaborado con este mismo material. La cantidad requerida de agregados fino y grueso para el caso en el que se produce hormigón y mortero con adición de catalizador agotado es la misma que para el caso sin adición, por lo tanto, el costo de estos materiales no se incluyó en la comparación económica ya que representa una cantidad que se mantiene constante en ambos casos. El estudio se realizó para un caso hipotético en el que la operación de la planta dure 10 años (Alsop, 2001, p. 202).

Se contabilizó los egresos del proyecto que corresponden a la inversión inicial, costos fijos, costos variables y depreciaciones de maquinaria y equipos. El único ingreso que se obtiene en el proceso es por la venta de sacos de cemento portland puzolánico cuya producción anual asciende a 99 000 sacos. Con estos parámetros se desarrolló el flujo de fondos para 10 años de funcionamiento de la planta que opera 330 días al año y los días restantes se destinan para mantenimiento de equipos (Alsop, 2001, p. 171).

La inversión inicial para poner en marcha la planta de producción de cemento portland puzolánico incluye los costos de materia prima, maquinaria, edificaciones, terreno, permisos municipales. En la Tabla 3.46 se presenta el costo de las materias primas necesarias para empezar a operar la planta durante su primer año de funcionamiento. Las cantidades de las materias primas

presentadas en esta tabla se obtuvieron del balance de masa del proceso y la inversión total requerida para adquirir estas materias primas es de \$ 445 759,03.

Tabla 3.46. Costo de materia prima para primer año de funcionamiento de la planta de producción de cemento portland puzolánico

Materia prima	Cantidad anual (ton)	Costo (\$/ton)	Costo anual (\$)
Caliza ¹	5 135,02	20,00	102 700,33
Arcilla ²	1 193,46	200,00	238 691,97
Mineral de hierro ³	139,08	350,00	48 679,24
Yeso ³	222,75	250,00	55 687,50
Total (\$)			445 759,03

¹(INP, 2013, p. 22)

²(Delgado, y Negrete, 2012, p. 155)

³(Obando, 2005, p. 120)

Para operar la planta de producción de cemento portland puzolánico se requieren 13 equipos y 11 bandas transportadoras para trasladar el material entre equipos y silos de almacenamiento, en la Tabla 3.47 se presentan los costos de cada uno de ellos. El costo total de la maquinaria requerida fue de \$ 376 750,00.

Tabla 3.47. Costos de los equipos

Equipo	Unidad	Costo (\$)	Total (\$)
Trituradora ³	1	15 000,00	15 000,00
Molino de bolas ⁶	2	70 000,00	140 000,00
Pre calentador ⁴	1	60 000,00	60 000,00
Horno ⁵	1	80 000,00	80 000,00
Enfriador ⁵	1	50 000,00	50 000,00
Banda transportadora ¹	11	1 250,00	13 750,00
Silos ²	6	3 000,00	18 000,00
Total			376 750,00

¹(Backhurst, Harker y Richardson, 2002, p. 70)

²(McNichols, 2013, p. 1)

³(Retsch, 2015, p. 1)

⁴(Metso, 2015, p. 1)

⁵(Henan Zhengzhou, 2015, pp. 1-4)

⁶(Zenith, 2015, p.1)

Para poder iniciar la producción de cemento portland puzolánico se requiere no solo materia prima y maquinaria sino también un terreno donde se llevará a cabo

el proceso, edificaciones y permisos municipales. Teniendo en cuenta estos factores, se calculó la inversión total que se necesita para operar la planta. Este valor ascendió hasta \$ 410 100,78. En la Tabla 3.48 se detalla las cantidades consideradas para el cálculo de la inversión total necesaria para empezar el proyecto.

Tabla 3.48. Inversión total requerida para arrancar el proyecto

Inversión	Costo (\$)
Reactivos	1 350,78
Equipos	376 750,00
Edificios	20 000,00
Terreno	10 000,00
Activos diferidos	2 000,00
Total	410 100,78

(INP, 2013, p. 17)

Los costos variables se muestran en la Tabla 3.49, entre estos se incluye los servicios industriales requeridos durante proceso, por ejemplo, la cantidad de agua utilizada para la operación de los molinos de bolas, limpieza de equipos, servicios auxiliares, etc. En este rubro también se incluye la electricidad que se ocupa para la operación de cada equipo y el costo de materia prima requerido para el primer año de operación de la planta.

Se calculó el costo anual de agua requerida para el proceso. Para esto se utilizó el dato del costo de agua para requerimientos industriales que es de 0,55 centavos/m³. A partir del balance de energía se determinó el total de energía eléctrica consumida dentro del proceso y con esto se calculó su costo anual. Para determinar este valor se utilizó el dato del costo de la energía eléctrica de 0,08 centavos por kW-h. El valor de los costos variables ascendió hasta \$ 548 290,99 (EPMAPS, 2015, p. 5; EEQ, 2014, p. 9).

Entre los costos fijos se incluye los valores que deben ser cancelados obligatoriamente ya sea que el proyecto haya generado ganancias o no. Estos valores corresponden a mantenimiento de equipos y salarios de trabajadores que

han sido contratados para ser parte del proyecto. Los salarios también incluyen los beneficios establecidos por la ley: aportaciones al IESS, vacaciones, décimo tercero y cuarto y fondos de reserva.

Tabla 3.49. Costos variables

	Costo anual (\$)
Materia Prima	445 759,03
Requerimientos Industriales	102 531,96
Total	548 290,99

(EEQ, 2014, p. 9)
(EPMAPS, 2015, p. 5)

Las cantidades que se invertirán en pago de salarios del personal que trabajará en la planta se muestran en la Tabla 3.50. Los trabajadores considerados para la operación de la planta incluyen 1 jefe de producción, 3 operarios y 2 guardias. Para el mantenimiento de equipos se invertirá \$ 50 000,00 cada año. En total, los costos fijos del proyecto ascienden a \$ 123 335,94, estos valores se pueden apreciar en la Tabla 3.51.

Tabla 3.50. Costos fijos del proyecto

Puesto	Salario mensual (\$)	Aporte al IESS (\$)	Décimo tercero (\$)	Vacaciones (\$)	Décimo cuarto (\$)	Fondo de reserva (\$)	Total (\$)	
(1) Jefe de producción	1 200,00	133,80	1 200,00	1 200,00	354,00	100,00	19 959,12	
(3) Operarios	800,00	89,20	800,00	800,00	354,00	66,60	40 272,24	
(2) Guardias	380,00	42,40	380,00	380,00	354,00	31,70	13 124,58	
(Santos, 2015, p. 142)							Total Anual	73 355,94

Los valores asignados a depreciación de maquinaria realizada a 15 años y depreciación de edificaciones realizada a 40 años, se presentan en la Tabla 3.52. En este proyecto, el único ingreso que se registra es por la venta de sacos de

cemento portland puzolánico. La cantidad de sacos de cemento para la venta fue determinada con base en la capacidad de producción de la planta.

Tabla 3.51. Costos fijos totales del proyecto

Gastos	Costo anual (\$)
Salarios	73 355,94
Mantenimiento	50 000,00
Total	123 355,94

Tabla 3.52. Depreciación de equipos y edificios

	Costo (\$)	Tiempo de depreciación (años)	Depreciación (\$)
Equipos	376 750,00	15	25 116,70
Edificios	20 000,00	40	500,00
		Total	25 616,70

El ingreso total que se obtiene por la venta de 99 000 sacos de cemento puzolánico de 50 kg es de \$ 792 000,00 por año. El ingreso que se obtiene por la producción de cemento portland puzolánico se presenta en la Tabla 3.53.

Se desarrolló el flujo de fondos del proyecto de producción de cemento portland puzolánico para un período de 10 años. En el flujo de caja se incluyó costos fijos, y variables, depreciación de equipos y edificios, ingresos por venta del producto, capital de trabajo que fue calculado como el 50 % del total de los costos variables más el total de los fijos y se consideró un préstamo para el pago del 40 % de la inversión inicial y 60 % el capital de trabajo.

Tabla 3.53. Ingresos por venta de producto

Producto final	Sacos de 50 kg (anual)	Precio saco (\$)	Ingreso (\$)
Cemento	99 000	8,00	792 000,00
		Total	792 000,00

Para obtener el interés del préstamo se consideró el valor indicado por la corporación financiera nacional que establece un interés del 8 % para préstamos destinados a proyectos industriales. La amortización del préstamo se calculó de modo que permita cancelar cuotas de igual valor durante el mismo tiempo de operación del proyecto (Santos, 2015, p. 142).

Los indicadores económicos que determinan la rentabilidad del proyecto se presenta en la Tabla 3.54 y el flujo de fondos del proyecto para 10 años se expone en el Anexo VI.

Tabla 3.54. Indicadores económicos del proyecto

Indicador	Valor
VAN	\$ 298 279,43
TIR	35 %
B/C	1,78
Pr	1,83 años

El proyecto presentó un valor presente neto de \$ 298 279,43 y su tasa interna de retorno fue 35 %, valor mayor a la tasa de oportunidad que se dispone en el país la cual es 21 %. Adicionalmente, se calculó que la inversión destinada al proyecto se recuperará en un período de tiempo de 1,83 años, y que la relación beneficio costo tiene un valor de 1,78.

3.7.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO SIN ADICIÓN DE CATALIZADOR AGOTADO

En esta sección se presenta el análisis económico realizado para la obtención de cemento portland sin adición de catalizador agotado. Estos resultados son diferentes de los expuestos en la sección 3.7.1 tan solo en los costos de la materia prima, debido a que es necesario utilizar mayor cantidad de cemento para cumplir con la producción de 15 000 kg de cemento portland por día. Los costos fijos, la depreciación de equipos y edificios y el ingreso por la comercialización de

cemento son los mismos, sin embargo los indicadores económicos presentaron valores distintos. Los costos de la materia prima requerida para un año de producción de cemento se presentan en la Tabla 3.55

Tabla 3.55. Costos de materia prima

Materia prima	Cantidad anual (ton)	Costo (\$/ton)	Costo anual (\$)
Caliza	5 705,57	20,00	114 111,47
Arcilla	1 326,07	200,00	265 213,30
Mineral de hierro	154,54	350,00	54 088,04
Yeso	247,50	250,00	61 875,00
		Total	495 287,81

El costo de la materia prima para producir cemento portland sin adición de catalizador agotado es de \$ 495 287,81, mientras que para producir cemento portland puzolánico es de \$ 445 759,03 dólares. En la Tabla 3.56 se muestran los indicadores económicos del caso en el que no se incluye la adición de catalizador agotado.

El valor actual neto del proyecto fue de \$ 119 023,37 y su tasa interna de retorno fue de 26 %, lo cual supera a la tasa de oportunidad del país solo en 4 % ya que el valor de esta es de 21 %. La relación beneficio costo fue igual a 1,30 y el tiempo de recuperación de la inversión fue de 1,83 años. Si estos valores se comparan con los obtenidos en la Tabla 3.54, se concluye que el proceso de obtención de cemento portland puzolánico a partir del catalizador agotado es más rentable que la producción de cemento portland sin la adición de este catalizador.

Tabla 3.56. Indicadores económicos del proyecto

Indicador	Valor
VAN	\$ 119 023,37
TIR	26 %
B/C	1,30
Pr	1,83 años

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Al caracterizar físicamente al catalizador agotado se observó que es necesario pulverizarlo con el fin de alcanzar un tamaño de partícula adecuado para reemplazar al cemento en mezclas de hormigón y mortero. La caracterización mineralógica evidenció que el catalizador FCC es un material compuesto mayoritariamente por silicio y aluminio, lo cual cumple con el requisito establecido para materiales puzolánicos en la norma INEN 490.
- La actividad puzolánica del catalizador agotado fue evaluada utilizando el método establecido en la norma INEN 496. Su índice es de 86,61 % y cumple con el requerimiento de la norma INEN 494 que establece que su valor debe ser mayor a 75 %, por lo tanto, se concluye que el catalizador FCC agotado es un material puzolánico de alta reactividad. (Perdidas por calcinación).
- Las muestras adicionadas con catalizador agotado disminuyeron el tiempo de fraguado en 14 % con respecto a la muestra patrón, por lo que este tipo de muestras son más adecuadas para trabajar en obras en las que se requiera alcanzar la resistencia máxima en periodos de tiempo cortos. Además, estas muestras presentaron un incremento en el calor de hidratación, lo cual puede tener efectos negativos por cambios de volumen y agrietamientos cuando es utilizado en estructuras de hormigón masivo, este incremento fue proporcional al aumento de cantidad de catalizador agotado adicionado a las mezclas.
- El contenido de aire del hormigón convencional, mortero estándar y de las muestras de hormigón y mortero que fueron adicionadas con 5 % y 10 % cumplen con el requisito de no ser mayor a 1,5 % establecido en el procedimiento de dosificación, mientras que las muestras de hormigón y mortero adicionadas con 15 % y 20 % de catalizador agotado exceden dicho valor.

- Las muestras de hormigón con adición de 15 % y 20 % de catalizador agotado no cumplen con los porcentajes de resistencia a la compresión esperados para cada edad de curado. Las probetas con reemplazo de 5 % y 10 % no cumplen los porcentajes para las primeras edades de curado, sin embargo, cumplen el requisito establecido para los 28 días de curado y alcanzan un valor adecuado para hormigón de esfuerzo de compresión de 210 kg/cm².
- Los resultados de las pruebas de expansión en autoclave de hormigón y de mortero mostraron que las probetas que fueron adicionadas con catalizador agotado presentan porcentajes de expansión que cumplen con lo establecido por la norma INEN 490 y que disminuyen conforme aumenta el porcentaje de catalizador incluido en la mezcla. A partir de estos valores se puede concluir que el hormigón adicionado con catalizador agotado es menos propenso a agrietamientos causados por la presencia de cal libre.
- Al final del período de 60 días de curado, todas las muestras de mortero adicionadas con catalizador agotado presentan el mismo porcentaje de contracción por secado, cumplen con lo establecido por la norma INEN 490 y presentan una mejora de 14 % con respecto al mortero estándar. La resistencia del mortero a la acción de una solución de sulfatos también incrementa en estas muestras, sin embargo, no es suficiente para obtener cemento portland resistente a los sulfatos ya que no cumplen el requisito de la norma INEN 490.
- La utilización de catalizador agotado como adición puzolánica no representa riesgo ambiental ya que los resultados del test de lixiviación TCLP de las muestras de hormigón con sustitución de 5, 10 y 15 % se encuentran por debajo de los valores máximos establecidos en las normativas de la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito y de la EPA.
- El porcentaje de adición de 10 % es el más conveniente técnica y económicamente para ser utilizado como aditivo de cemento portland ya que cumple con los requerimientos especificados en las diferentes normas para

desempeño de hormigón y mortero y permite reutilizar mayor cantidad de material desechado.

- La ingeniería básica de una planta piloto con capacidad para producir 15 000 kg de cemento portland puzolánico por día y para elaborar hormigón con esta cantidad de material fue desarrollada con base en la dosificación determinada para 10 % de adición de catalizador. Al evaluar los parámetros económicos VAN y TIR quedó demostrado que el proceso de obtención de hormigón y mortero con la adición de catalizador agotado es más rentable que la obtención de hormigón y mortero sin la adición del mismo, ya que dichos parámetros fueron mayores para el primer caso.

4.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda estudiar el efecto que tiene la calcinación del catalizador agotado sobre su actividad puzolánica. Este proceso puede destruir la estructura cristalina del material y formar una estructura amorfa o desordenada que mejore sus propiedades puzolánicas.
- Estudiar la influencia que tiene el catalizador agotado al ser incluido directamente dentro del horno rotatorio en el proceso de producción de clínker. En el presente trabajo fue incluido en la molienda final del proceso.
- Investigar los resultados que se obtienen al adicionar el catalizador agotado como reemplazo de agregado fino en lugar de reemplazo de cemento portland.
- Promover el uso del catalizador agotado de FCC entre las empresas productoras de cemento y de hormigón premezclado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alsop, P. (2001). *The Cement Plant Operations Handbook. The concise guide to cement manufacture* (3ra. ed.). Portsmouth, Reino Unido: Tradeship Publications Ltd.
2. Al-Attar, T. (2013). A mathematical model for predicting autoclave expansion for portland cement. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 4(1), 111-116. Recuperado de https://www.academia.edu/3672162/A_MATHEMATICAL_MODEL_FOR_PREDICTING_AUTOCLAVE_EXPANSION_FOR_PORTLAND_CEMENT (Diciembre, 2014)
3. Al-Chaar, G., Alkadi, M., Yaksic, D. y Kallemeyn, L. (2011). *The Use of Natural Pozzolan in Concrete as an Additive or Substitute for Cement*. Recuperado de <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a558534.pdf> (Julio, 2015)
4. American Concrete Institute. (2013). *Aggregates for Concrete*. Recuperado de http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/tecnologia_hormigon/E1_07.pdf (Marzo, 2015)
5. American Concrete Institute. (2014). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Recuperado de http://www.icie.ir/files/filebox/211.1_91.pdf (Febrero, 2015)
6. Arcos, C. (2013). *Algunos aspectos de los hormigones con aire incorporado*. Recuperado de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/2709/3021> (Agosto, 2015)
7. ASTM. (2003a). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement: ASTM C 188-95*. Recuperado de <ftp://ftp.ecn.purdue.edu/olek/>

[PTanikela/To%20Prof.%20Olek/ASTM%20standards/density%20of%20hyddraulic%20cements%20C188.pdf](#) (Marzo,2015)

8. ASTM. (2003b). *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method: ASTM C 231-03*. Recuperado de <http://civilgeeks.com/2011/04/02/contenido-de-aire-del-concreto-fresco-metodo-de-presion-resumen-astm-c-231/> (Marzo, 2015)
9. Backhurst, J., Harker, J. y Richardson, J. (2002). *Chemical Engineering* (5ta. ed.). Londres: Butterworth-Heinemann publications.
10. Balarezo, M. (2013). *Exposición Ocupacional al Cromo Hexavalente, proveniente del Cemento y Humos de Soldadura*. Recuperado de http://www.epsica.com/Publicaciones/Cromo_Hexavalente_Balarezo.pdf (Julio, 2015)
11. Barrera, A. (2015). *Recuperación de níquel, vanadio y molibdeno del catalizador agotado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC)*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniera Química). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
12. Behera, B., Ray, S. y Singh, I. (2007). NMR Studies of FCC Feeds, Catalysts and Coke. En Ocelli, M. (Ed.). *Fluid Catalytic Cracking VII: Materials, Methods and Process Innovations*. (pp. 163-197). Amsterdam: Elsevier.
13. Bensted, J. y Barnes, P. (2008). *Estructura y Desempeño del Cemento*. (2da. ed.). New York, Estados Unidos: Taylor & Francis Group.
14. Bhattacharyya, R. (2010). *Conocimientos sobre Catalizadores de FCC*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/29311708/Know-More-About-FCC-Catalysts>. (Febrero, 2015).

15. Blanco, F. (2005). *Cemento. Materiales de adición*. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.CEMENTOS.MaterialesAdicion.pdf> (Junio, 2015)
16. Boateng, A. (2008). *Hornos Rotatorios. Fenómenos de transporte y procesos de transporte* (1ra. ed.). Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
17. Borrachero, M., Monzó, J., Payá, J., Peris-Mora, E., Vunda, C., Velásquez, S. y Soriano, L. (2002). *El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento portland: las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica*. Recuperado de http://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/036_PAYA.PDF. (Noviembre, 2014)
18. Borrachero, R., Monzó, J., Payá, J., Vunda, C., Velásquez, S. y Soriano, L. (2014). Spent FCC catalyst for improving early strength of Portland cement. *Materials Journal*. 111(1), 59-66. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/51723/versi%C3%B3n%20de%20autor%20tiempos%20cortos%20ACI%20%20R2%20julio%202013.pdf?sequence=3> (Julio, 2015)
19. Boskovic, G. y Baerns, M. (2004). Catalyst Deactivation. En Baerns, M. (Ed.). *Basic Principles in Applied Catalysis*. (pp. 477-503). Berlin: Springer.
20. Brunjes, U. (2014). *Pozzolans. Thrash to Treasure*. Recuperado de <http://ferrocement.net/ferro/files/pozzolans-uwe.html> (Enero, 2015)
21. Burgos, D., Cardona, L. y Delvasto, S. (2014). *Estudio de dos materiales volcánicos y efecto del tipo de molienda en su reactividad*. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732014000200003 (Marzo, 2015)

22. Cedeño, C., Domínguez, E. y Ortega, S. (2002). *Proyecto para la creación de una empresa productora y comercializadora de carbonato de calcio*. (Tesis de grado previo a la obtención de título de Economista en gestión empresarial con especialización en Finanzas). Escuela Superior Politécnica del Litoral.
23. Cervantes, H. (2009). *Sistema de Gestión Ambiental para los desechos peligrosos de la Refinería Estatal de Esmeraldas*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
24. Chacón, J. y Lema, A. (2012). *Estudio comparativo de elementos prefabricados de hormigón con material reciclado PET (Polietileno Tereftalato) y de hormigón convencional*. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
25. Corma, A. y Sauvanaud, L. (2007). Increasing LCO Yield and Quality in the FCC: Cracking Pathways Analysis. En Occelli, M. (Ed.). *Fluid Catalytic Cracking VII: Materials, Methods and Process Innovations*. (pp. 41-53). Amsterdam: Elsevier.
26. Day, R. (2011). *Pozzolans for use in low-cost housing*. Recuperado de <http://idl-bnc.idrc.ca/dspace/bitstream/10625/5782/1/49685.pdf> (Junio, 2015)
27. Delgado, A. y Negrete, C. (2012). *Evaluación del uso de arcillas y puzolanas en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento portland puzolánico tipo IP*. (Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Químico). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

28. Deolalkar, S. (2009). *Handbook for Designing Cement Plants*. Recuperado de <http://dualibra.com/wp-content/uploads/2012/12/8178001454.pdf>. (Abril, 2015)
29. Duda, W. (2003). *Manual tecnológico del cemento* (2da. Ed.). Barcelona: Reverté.
30. Dupain, X., Krul, R. y Makkee, M. (2005). *Are Fischer-Tropsch waxes good feedstocks for fluid catalytic cracking units?*. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586105005419>. (Enero, 2015).
31. EEQ. (2014). *Pliego tarifario vigente*. Recuperado de <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/PLIEGO+TARIFARIO+MARZO+2014/784c96b6-94e4-49a0-b505-8b78638d9687> (Abril, 2015)
32. Efe. (2014). *La Enami confía en potencial proyecto ferroso en Esmeraldas*. Recuperado de <http://www.eluniverso.com/noticias/2014/03/22/nota/2431786/enami-confia-potencial-proyecto-ferroso-esmeraldas> (Julio, 2015)
33. EPA. (1992). *Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) for VOCs, SVOCs, Chlorinated Pesticides and Herbicides, and Metals by SW-846 Method 1311 and Analysis*. Recuperado de <http://www2.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/tclp.pdf> (Abril, 2015)
34. EPMAPS. (2015). *Sistema de recaudación*. Recuperado de <http://www.aguaquito.gob.ec/sistema-de-recaudacion> (Abril, 2015)

35. Fornalczyk, A. (2012). *Catalizadores industriales como fuente de metales valiosos*. Recuperado de http://www.journalamme.org/papers_vol55_2/58299.pdf. (Abril, 2015).
36. Gabalec, M. (2008). *Tiempo de fraguado del hormigón*. Recuperado de http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/Tesis2008_Anabela-Gabalec_Tiempo-de-Fraguado-del-Hormigon.pdf (Marzo, 2015)
37. García, M., Sánchez, M. y Frías, M. (2007). Pozzolanic reaction of a spent fluid catalytic cracking catalyst in FCC-cement mortars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 90(2), 443-447. doi: 10.1007/s10973-006-7921-7
38. Gary, J. y Handwerk, G. (2007). *Petroleum Refining: Technology and Economics* (5ta. ed.). Florida, Estados Unidos: CRC Press.
39. Gibbons, P. (2012). *Puzolanas para morteros*. Recuperado de <http://www.buildingconservation.com/articles/pozzo/pozzo.htm>. (Junio, 2015).
40. Girard, J. (2011). *El uso de puzolanas en el concreto*. Recuperado de <http://www.concretecountertopinstitute.com/2011/10/the-use-of-pozzolans-in-concrete/> (Febrero, 2015)
41. Gläser, R. y Weitkamp, J. (2004). The Application of Zeolites in Catalysis. En Baerns, M. (Ed.). *Basic Principles in Applied Catalysis*. (pp. 159-212). Berlin: Springer.
42. Gomá, F. (2009). *El cemento portland y otros aglomerantes. Fundamentos para la interpretación de su comportamiento en obra*. (1ra. ed.). Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados, S.A.

43. Grace Catalysts Technologies. (2014). *EP PETROECUADOR - Esmeraldas, Ecuador: Equilibrium FCCU Catalyst Analyses*. Analytical Service Center, Maryland, Estados Unidos.
44. Grigaliūnas, P. y Rudžionis, Z. (2014). Investigation and comparison of self-compacting fiber reinforced concrete properties incorporating fly ash and zeolitic additives. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 4(9), 37-38. doi: 10.5755/j01.sace.9.4.7482
45. Henan Zhengzhou. (2015). *Mining Machinery*. Recuperado de http://es.made-in-china.com/co_hnzkjq/product-group/rotary-kiln_hyhssurg_1.html (Agosto, 2015)
46. Hoffman, G. (2013). *Puzolanas y materiales cementantes suplementarios*. Recuperado de <http://www.segemar.gov.ar/bibliotecaintemin/LIBROS DIGITALES/Industrialminerals&rocks7ed/pdf/files/papers/084.pdf> (Marzo, 2015)
47. Holcim. (2011a). *Nuestros procesos de producción. Cemento, hormigón y agregados*. Recuperado de http://holcimecuador.com/docs_comunicacion/procesos_de_produccion/files/assets/downloads/publicacion.pdf (Febrero, 2015)
48. Holcim. (2011b). *Ficha de datos de seguridad del clínker de cemento Portland*. Recuperado de http://www.holcim.es/fileadmin/templates/ESP/doc/Fichas_Seguridad_Cemento/FDS-clinker-Octubre11_01.pdf (Mayo, 2015)
49. Holcim. (2014). *Certificado de productos. Cemento Holcim Rocafuerte Tipo GU*. Recuperado de http://www.holcim.com.ec/fileadmin/templates/EC/doc/Archivos_varios/Folleto_Cemento_Holcim_GU.pdf (Mayo, 2015)

50. Hudec, P. (2011). *FCC Catalyst - Key element in refinery technology*. Recuperado de http://www.vurup.sk/sites/default/files/downloads/46_ft_hudec-fcc.pdf. (Abril, 2015).
51. Hutchings, G. y Védrine, J. (2004). *Heterogeneous Catalyst Preparation* doi: 10.1007/978-3-662-05981-4
52. INEN. (1980). *Norma Técnica Ecuatoriana: Puzolanas. Determinación del índice de actividad puzolánica. Método del cemento*. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0496.1981.pdf>. (Noviembre, 2014)
53. INEN. (2008). *Ceniza volante o puzolana natural para su uso en el hormigón de cemento portland*. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1501.2011.pdf> (Noviembre, 2014)
54. INEN. (2009a). *Norma Técnica Ecuatoriana: Cemento Hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat*. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0158.2009.pdf> (Junio, 2015)
55. INEN. (2009b). *Norma Técnica Ecuatoriana: Cemento Hidráulico. Determinación del calor de hidratación*. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0199.2009.pdf> (Junio, 2015)
56. INEN. (2009c). *Norma Técnica Ecuatoriana: Cemento Hidráulico. Determinación de la expansión en autoclave*. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0200.2009.pdf> (Junio, 2015)
57. INEN. (2009d). *Norma Técnica Ecuatoriana: Mortero y Hormigón. Determinación del cambio de longitud del mortero y del hormigón endurecidos*. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2504.2009.pdf> (Junio, 2015)

58. INEN. (2009e). *Norma Técnica Ecuatoriana: Cemento Hidráulico. Determinación del cambio de longitud en morteros expuestos a una solución de sulfato.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2503.2009.pdf> (Junio, 2015)
59. INEN. (2010a). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0858.2010.pdf> (Junio, 2015)
60. INEN. (2010b). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0857.2010.pdf> (Junio, 2015)
61. INEN. (2010c). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0856.2010.pdf> (Junio, 2015)
62. INEN. (2010d). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0855.2010.pdf>. (Noviembre, 2014)
63. INEN. (2010e). *Norma Técnica Ecuatoriana: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1573.2010.pdf> (Junio, 2015)
64. INEN. (2011a). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0696.2011.pdf> (Junio, 2015)

65. INEN. (2011b). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos para hormigón. Requisitos.* Recuperado de <https://law.resource.org/ec/ibr/ec.nte.0872.2011.pdf> (Junio, 2015)
66. INEN. (2011c). *Norma Técnica Ecuatoriana: Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1576.2011.pdf> (Junio, 2015)
67. INEN. (2011d). *Norma Técnica Ecuatoriana: Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0490.2011.pdf> (Julio, 2015)
68. INEN. (2012a). *Cemento Portland. Requisitos.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0152.2012.pdf> (Noviembre, 2014)
69. INEN. (2012b). *Hormigón de cemento portland. Ceniza volante o puzolana natural para su uso en el hormigón de cemento portland. Muestro y ensayos.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0494.1981.pdf> (Noviembre, 2014)
70. INEN. (2012c). *Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos.* Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2380.2012.pdf> (Noviembre, 2014)
71. INP. (2013). *Estudio básico de la Industria Cementera en Ecuador.* Recuperado de <http://www.joomag.com/magazine/estudio-b%C3%A1sico-de-la-industria-cementera-en-ecuador/0584234001377620541?page=15> (Abril, 2015)

72. Khang, S. y Mosby, J. (2006). Catalyst deactivation due to deposition of reaction products in macropores during hydroprocessing of petroleum residuals. Recuperado de <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i200033a015>. (Marzo, 2015).
73. King, B. (2013). *A Brief Introduction to Pozzolans*. Recuperado de <http://www.ecobuildnetwork.org/pozzo.html>. (Marzo, 2015)
74. Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J. (2004). *Libro diseño y control de mezclas de concreto*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/189238711/Libro-Diseno-y-control-de-mezclas-de-concreto-PCA-1>. (Marzo, 2015)
75. Lloyd, L. (2011). *Manual de catalizadores industriales*. Recuperado de <http://www.springer.com/us/book/9780387246826#>. (Junio, 2015).
76. Lohtia, R. y Joshi, R. (2005). *Concrete Admixtures Handbook. Mineral admixtures*. (1ra. ed.). New Jersey, Estados Unidos: Noyes Publications.
77. Magee, J. y Dolbear, G. (2010). *Catalizadores de la industria del petróleo en lenguaje no técnico* (1ra. ed.). Estados Unidos: Pennwell Publishing Company.
78. Malhotra, V., y Mehta, P. (2006). *Materiales puzolánicos y cementantes*. (1ra. ed.). Ottawa, Canada: Gordon and Breach Publishers.
79. Malisch, W. (2010). *Agregados para hormigón*. Recuperado de http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap05.pdf (Febrero, 2015)
80. MathPro. (2011). *Introducción a la Refinación del Petróleo y Producción de Gasolina y Diesel con contenido ultra bajo de azufre*. Recuperado de

http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf. (Marzo, 2015).

81. McNichols. (2013). *Tamices industriales*. Recuperado de <http://www.mcnichols.com/spanish/products/wiremesh/sieves/test/> (Agosto, 2015)
82. Metso. (2015). *Mining*. Recuperado de <http://www.metso.com/industries/mining/?OpenDocument> (Agosto, 2015)
83. Molina, F. (2014). *Modelo para la determinación de actividad puzolánica por correlación entre: difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, y método del cemento*. (Tesis de Grado previo A la obtención del Título de Ingeniero Químico). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
84. Moore, H., Mitchell, M. y Hoffman, J. (2003). Residual feed cracking catalyst. En Magee, J. y Mitchell, M. (Ed.). *Fluid Catalytic Cracking: Science and Technology*, (pp. 293-338). Amsterdam: Elsevier
85. Morales, T. (2012). *Determinación de la expansión en autoclave del cemento portland*. Recuperado de <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/Determinacion%20de%20la%20expansion%20en%20autoclave%20del%20cemento.pdf> (Julio, 2015)
86. Naik, T., Singh, S. y Hossain, M. (2013). *Permeabilidad del concreto con gran contenido de ceniza volante*. Recuperado de <https://www4.uwm.edu/cbu/Papers/1993%20CBU%20Reports/REP-156A.pdf> (Julio, 2015)
87. Najimi, M., Parhizkar, T., Pourkhorshidi, A., Jafarpour, F., Hillemeier, B. y Herr, R. (2010). *Proposing a New Approach for Qualification of Natural*

Pozzolans. Recuperado de http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/9552010A604.pdf (Abril, 2015)

88. Obando, M. (2005). *Proyecto de pre-factibilidad para la exportación de cemento a Iquitos – Perú utilizando la red fluvial del Río Napo.* (Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera en Comercio Exterior e Integración). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
89. Otsuki, L. (2010). *Uso de adiciones minerales en el concreto.* Recuperado de <http://www.ide.titech.ac.jp/~otsukilab/lecture/advanced%20concrete%20technology/11-1%20Wan-brief%20intro%20Use%20of%20Mineral%20Admixture%20in%20Concrete.pdf> (Mayo, 2015)
90. O'Connor, P. (2007). Catalytic Cracking: The future of an Evolving Process. En Occelli, M. (Ed.). *Fluid Catalytic Cracking VII: Materials, Methods and Process Innovations.* (pp. 227-250). Amsterdam: Elsevier.
91. Passamonti, J. (2008). *Evaluación de catalizadores FCC comerciales. Análisis de productos de importancia industrial.* Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586107009595>. (Julio, 2015).
92. Polanco, A. (2014). *Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto.* Recuperado de http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_LAB_DE_CONCRETO.pdf. (Febrero, 2015)
93. Retsch. (2015). *Solutions in Milling & Sieving.* Recuperado de <http://www.retsch.es/es/productos/molienda/trituradoras-de-mandibulas/bb-200/funcionamiento-caracteristicas/> (Agosto, 2015)
94. Rodríguez, R., Juárez, D. y Uribe, R. (2010). *Los cementos puzolánicos aumentan la resistencia del concreto al ataque de sulfatos.* Recuperado

- de <http://www.imcyc.com/revista/2000/julio2000/pusolanicos3.htm>
(Noviembre, 2014)
95. Roszczynialski, W. (2002). *Determinación de la actividad puzolánica de materiales mediante análisis térmico*. doi: 10.1023/A:1021660020674
 96. Sadeghbeige, R. (2000). *Fluid Catalytic Cracking Handbook* (2da. ed.). Estados Unidos: Butterworth-Heinemann publications.
 97. Salbilla, D., Kolmetz, K., Sim, C. y Soyza, C. (2002). *Fluidized Catalytic Cracker Catalyst Selection: Equilibrium Catalyst Quality and Considerations for Selections*. Recuperado de <http://kolmetz.com/pdf/articles/FCC-Catalytic-Cracking-Rev-intro.pdf>. (Diciembre, 2014)
 98. Sánchez, I. y Frías, M. (2010). *Comportamiento térmico de los materiales puzolánicos en la hidratación del cemento*. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/39903/1/0001.pdf>. (Mayo, 2015)
 99. Santos, W. (2015). *Estudio de factibilidad económica para la creación de una empresa dedicada a la comercialización y producción de bebidas de horchata*. (Tesis de grado previo a la obtención de título de Ingeniero Comercial). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
 100. Secretaría de Ambiente. (2014). *Resolución 002-SA-2014: Normas Técnicas para la aplicación de la Ordenanzas Metropolitanas Sustitutiva del Título V, "Del Medio Ambiente" del Libro Segundo del Código Municipal*. Recuperado de http://www.quitoambiente.gob.ec/images/M_images/documentos/resol_002_2014.PDF (Julio, 2015)
 101. Siddique, R y Khan, M. (2011). *Supplementary Cementing Materials*. doi: 10.1007/978-3-642-17866-5

102. Thomas, M. (2014). *Optimización del uso de ceniza volante en el concreto*. Recuperado de http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf (Marzo, 2015)
103. Torres, J., Baquero, E., y Silva, A. (2009). *Evaluación de la actividad puzolánica de un residuo de la industria del petróleo*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a05v76n158.pdf> (Mayo, 2015)
104. Torres, J., Izquierdo, S., Trochez, J. y Mejía, R. (2012). Estudio comparativo de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC), y metacaolín (MK). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(1), 7-17. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/911/91125275001.pdf> (Marzo, 2015)
105. Torres, N. y Torres, J. (2010). Uso del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como adición puzolánica – revisión. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 35-52. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91125275001>. (Noviembre, 2014)
106. Trochez, J., Torres, J. y Mejía, R. (2010). Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refinería colombiana. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 1(55), 26-34. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302010000500003&lng=en&tlng=es. (Febrero, 2015)
107. Trochez, J., Torres, J. y Mejía, R. (2012). Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 148-151. Recuperado de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/939/844> (Julio, 2015)

108. Tseng, Y., Huang, C. y Hsu, K. (2004). *Actividad puzolánica de catalizador FCC agotado calcinado y su efecto sobre la resistencia a la compresión de materiales cementantes*. doi:10.1016/j.cemconres.2004.04.026
109. Valcuende, M., Marco, E., Jardón, R. y Gil, A. (2013). *Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura*. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12793/Evoluci%C3%B3n%20resistencia%20hormig%C3%B3n.pdf> (Septiembre, 2014)
110. Valdez, L., Suárez, G. y Proaño, G. (2012) *Hormigones Livianos*. Recuperado de <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/LivianoT8.htm> (Noviembre, 2014)
111. Velezmoro A., Blanco, H. y Peñuela, C. (2014). Influencia del nitrato presente en el agua de mezclado sobre las propiedades físicas del concreto. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(2), 61-68. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-40652014000200006&script=sci_arttext (Octubre, 2014)
112. Vilssa, E. (2014). *Hormigones de fraguado rápido*. Recuperado de <http://vilssa.com/hormigones-de-fraguado-rapido> (Octubre, 2014)
113. Walker, R. y Pavía, S. (2015). *Efecto de las propiedades puzolánicas sobre las propiedades de materiales de construcción*. Recuperado de <http://www.tara.tcd.ie/bitstream/handle/2262/57404/EFFECT%20OF%20POZZOLAN%20PROPERTIES%20ON%20THE%20PROPERTIES%20OF%20BUILDING%20COMPOSITES.pdf?sequence=1> (Octubre, 2014)
114. Wilson, J. y Ding, Y. (2007). *Reporte extensivo sobre propiedades de adiciones puzolánicas*. Recuperado de http://www.dpl.gov.mp/new/pagan/Site/Department_of_Public_Lands_files/Final_Phase_2_Report_04_17_07t-1.pdf (Octubre, 2014)

115. Woltermann, G., Magee, J. y Griffith, S. (2003). Commercial preparation and characterization of FCC catalysts. En Magee, J. y Mitchell, M. (Ed.). *Fluid Catalytic Cracking: Science and Technology*, (pp. 105-144). Amsterdam: Elsevier.
116. Yazici, H. (2010). *Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Natural Pozzolans*. Recuperado de http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap03.pdf. (Febrero, 2015)
117. Zenith. (2015). *Equipos de molienda*. Recuperado de <http://es.zenithcrusher.com/products/molino/?campaignid=224103783&DEV=c&keyword=molino%20de%20bolas&ad=73763287863&gclid=CIOOmff6tskCFQcYHwodlikBAw> (Agosto, 2015)
118. Žvironaitė, J., Pundienė, I., Antonovič, V. y Balkevičius, V. (2011). Investigation of Peculiarities in the Hardening Process of Portland Cements with Active Additives out of Waste. *Materials Science*, 17(1), 73-76. Recuperado de <http://www.chemtech.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/254/214>. (Julio, 2015)

ANEXOS

ANEXO I

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MINERALÓGICA DEL
CATALIZADOR FCC**

- **Determinación de densidad real del catalizador agotado**

Tabla AI. 1. Resultados de la densidad real del catalizador agotado

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
P ₁ (g)	330,9	327	329,5	329,1
V ₁ (mL)	0,5	0,6	0,7	0,6
P ₂ (g)	384,9	379,9	382,4	382,4
V ₂ (mL)	21,6	21,1	21,4	21,4
Densidad (g/cm ³)	2,56	2,58	2,56	2,57

La densidad real del catalizador agotado fue calculada con la ecuación [AI.1] de acuerdo al método detallado en la sección 2.2.1.1 (ASTM, 2003a, p. 2).

$$\rho_{cat} = \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} \quad [AI.1]$$

Donde:

ρ_{cat} : Densidad real del catalizador agotado (g/cm³)

P_1 : Peso inicial de la muestra más el frasco (g)

P_2 : Peso final de la muestra más el frasco (g)

V_1 : Lectura de volumen inicial de la muestra (cm³)

V_2 : Lectura de volumen final de la muestra (cm³)

Ejemplo de cálculo:

$$\rho_{cat} = \frac{382,4 \text{ g} - 329,1 \text{ g}}{21,4 \text{ cm}^3 - 0,6 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_{cat} = 2,57 \text{ g/cm}^3$$

- **Caracterización mineralógica del catalizador agotado**

Los componentes que posee el catalizador agotado fueron cualificados con el software Diffrac Plus del difractor de rayos X, el cual permite determinar los minerales que constituyen un material comparando los picos presentados en el difractograma con la información de su base de datos. El funcionamiento del software mencionado se ilustra en la Figura AI. 1.

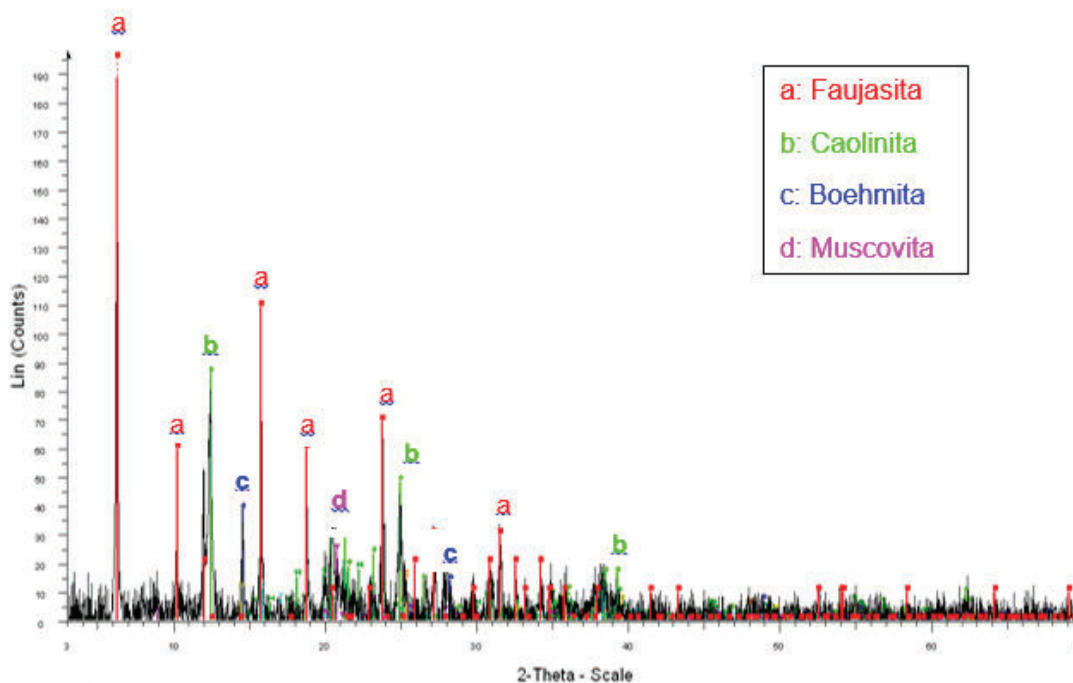


Figura AI. 1. Difractograma del catalizador agotado

- **Requerimientos físicos y químicos para que el catalizador agotado sea apto para ser utilizado como puzolana**

En la Tabla AI.2 se muestran los requerimientos físicos y químicos para que las puzolanas puedan ser utilizadas como materiales cementantes suplementarios de acuerdo con la norma INEN 1501 “Hormigón de cemento portland. Ceniza volante o puzolana natural para su uso en el hormigón de cemento portland. Muestro y ensayos.”

Tabla AI. 2. Requisitos físicos y químicos de las puzolanas naturales o calcinas de la norma INEN 1501

Requisito		Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Superficie específica			300	---	INEN 196
Índice de actividad puzolánica	Con cemento portland a los 28 días	%	75	---	INEN 495
	Con cal a los 7 días	MPa	4	---	INEN 496
Constancia de volumen	Expansión en autoclave	%	%	0,5	INEN 200
Pérdidas por calcinación		%	---		INEN 498

(INEN, 2012b, pp. 1-2)

ANEXO II

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE CEMENTO Y AGREGADOS FINO Y GRUESO

- **Densidad real del cemento**

Tabla AII. 1. Resultados de la densidad real del cemento

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
P ₁ (g)	325,9	331,3	329,6	328,6
V ₁ (mL)	0,5	0,7	0,8	0,6
P ₂ (g)	385,5	388,8	387,2	387,1
V ₂ (mL)	21,6	20,9	21,0	21,2
Densidad (g/cm ³)	2,82	2,85	2,84	2,84

La densidad real del cemento fue calculada con la ecuación [AII.1] de acuerdo al método explicado en la sección 2.2.1.1 (ASTM, 2003a, p. 2).

$$\rho_{\text{cemento}} = \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} \quad \text{[AII.1]}$$

Donde:

ρ_{cemento} : Densidad real del cemento (g/cm³)

P_1 : Peso inicial de la muestra más el frasco (g)

P_2 : Peso final de la muestra más el frasco (g)

V_1 : Lectura de volumen inicial de la muestra (cm³)

V_2 : Lectura de volumen final de la muestra (cm³)

Ejemplo de cálculo:

$$\rho_{\text{cemento}} = \frac{387,1 \text{ g} - 328,6 \text{ g}}{21,2 \text{ cm}^3 - 0,6 \text{ cm}^3}$$

$$\rho_{\text{cemento}} = 2,84 \text{ g/cm}^3$$

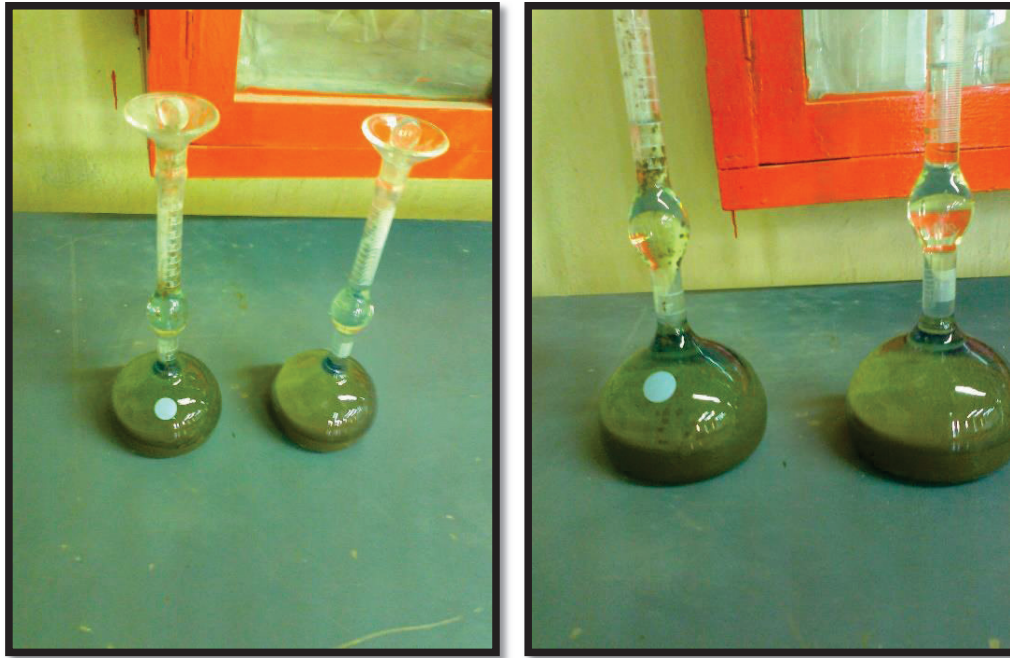


Figura AII. 1. Ensayo de densidad real del cemento

- **Densidad suelta y compactada del cemento**

Tabla AII. 2. Resultados de la densidad suelta y compactada del cemento

	Muestra suelta	Muestra compactada
Peso 1 (g)	471,2	548,2
Peso 2 (g)	471,0	555,9
Peso 3 (g)	471,2	552,1
Promedio	471,1	552,1

La ecuación empleada para la determinación de las densidades suelta y compactada del cemento fue la AII.2.

$$\rho = \frac{\bar{P} - P_{\text{molde}}}{V}$$

[AII.2]

Donde:

ρ : Densidad suelta o compactada del cemento (g/cm^3)

P_{molde} : Peso del molde (g)

\bar{P} : Promedio de pesos del molde más la muestra suelta o compactada (g)

V : Volumen del molde (cm^3)

Tabla AII. 3. Datos del molde utilizado en los ensayos de densidad suelta y compactada del cemento

Parámetro	Valor	Unidad
Altura	14,6	cm
Diámetro	5,1	cm
Volumen	298,25	cm^3
Peso	158	g

Utilizando los resultados de la Tabla AII.2 y los datos experimentales de la Tabla AII.3 se calculó las densidades suelta y compactada del cemento.

Ejemplo de cálculo:

$$\rho_{suelta} = \frac{471,1 \text{ g} - 158,0 \text{ g}}{298,2 \text{ cm}^3} = 1,05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\rho_{compactada} = \frac{552,1 \text{ g} - 158,0 \text{ g}}{298,2 \text{ cm}^3} = 1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- **Densidad real y absorción del agregado grueso**

Los datos experimentales para obtener la densidad real y absorción del agregado grueso se muestran en la Tabla AII.4. La densidad real fue calculada con la expresión [2.1] y la absorción con la ecuación [2.2].

Tabla AII. 4. Resultados de los ensayos de densidad real y absorción del agregado grueso

Variable	Valor	Unidad
Masa de muestra seca (A)	2 873,80	g
Masa de la muestra SSS (B)	3 001,20	g
Masa aparente de muestra saturada (C)	1 817,50	g

$$Densidad (SSS), kg/m^3 = \frac{997,5 \times 3\,001,2}{(3\,001,2 - 1\,817,5)} = 2,53 \frac{g}{cm^3}$$

$$Absorción, \% = \frac{(3\,001,2 - 2\,783,8)}{2\,783,8} \times 100 = 4,43 \%$$

- **Densidad suelta y compactada del agregado grueso**

Los datos experimentales determinados para el calcular estas propiedades se muestran en la Tabla AII.5 y en la Tabla AII.6.

Tabla AII. 5. Resultados de la densidad suelta y compactada del agregado grueso

	Muestra suelta	Muestra compactada
Peso 1 (g)	25 202	26 342
Peso 2 (g)	25 194	26 128
Peso 3 (g)	25 188	26 237
Promedio	25 195	26 235

Tabla AII. 6. Datos del molde utilizado en los ensayos de densidad suelta y compactada del agregado grueso

Parámetro	Valor	Unidad
Altura	27,8	cm
Diámetro	25,3	cm
Volumen	13 975,8	cm ³
Peso	5 468,0	g

La ecuación empleada para la determinación de las densidades suelta y compactada del agregado grueso fue la AII.2. Utilizando los resultados de la Tabla AII.5 y los datos experimentales de la Tabla AII.6 se calculó las densidades suelta y compactada.

- **Módulo de finura del agregado fino**

Utilizando la ecuación AII.3 se calculó el módulo de finura del agregado fino.

$$M.F = \frac{\sum \% \text{ Retenidos acumulados hasta el tamiz N}^\circ 100}{100} \quad [\text{AII.3}]$$

Donde:

M.F: módulo de finura, número adimensional

$$M.F = \frac{\sum 0,00 + 4,95 + 20,28 + 40,68 + 59,17 + 77,12 + 93,16}{100}$$

$$M.F = 2,95$$

- **Densidad real y absorción del agregado fino**

Tabla AII. 7. Resultados de los ensayos de densidad real y absorción del agregado fino

Parámetro	Valor	Unidad
Masa de muestra seca (A)	443,30	g
Masa de picnómetro + agua (B)	714,50	g
Masa de picnómetro + muestra (C)	998,50	g
Masa de muestra saturada superficialmente seca (S)	500,00	g

Los datos experimentales para la determinación de la densidad real y absorción del agregado fino se muestran en la Tabla AII.7. La densidad real fue calculada con la expresión [2.3] y la absorción con la ecuación [2.4]

$$\text{Densidad real (SSS)} (kg/m^3) = \frac{997,5 \times S}{(B + S - C)}$$

$$\text{Densidad (SSS)}, kg/m^3 = \frac{997,5 \times 500,0}{(714,5 + 500,0 - 998,5)} = 2,31$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(S - A)}{A} \times 100$$

$$\text{Absorción, \%} = \frac{(500,0 - 443,3)}{443,3} \times 100 = 9,79 \%$$

- **Densidad suelta y compactada del agregado fino**

Los datos experimentales determinados para calcular estas propiedades se muestran en la Tabla AII.8. La ecuación empleada para la determinación de las densidades suelta y compactada del agregado fino fue la AII.2. Utilizando los datos experimentales de la Tabla AII.8 y los de datos de la Tabla AII.9 se calculó las densidades suelta y compactada del agregado fino.

Tabla AII. 8. Resultados de la densidad suelta y compactada del agregado fino

	Muestra suelta	Muestra compactada
Peso 1 (g)	20 202	21 790
Peso 2 (g)	20 218	21 790
Peso 3 (g)	20 211	21 788
Promedio	20 210	21 790

Tabla AII. 9. Datos del molde utilizado en los ensayos de densidad suelta y compactada del agregado fino

Parámetro	Valor	Unidad
Altura	29,1	cm
Diámetro	20,1	cm
Volumen	9233,7	cm ³
Peso	4818,0	g

- **Contenido orgánico de agregado fino**

El líquido sobrenadante de la muestra de agregado fino obtenido al finalizar el ensayo presentó un color más claro que el No. 1 del comparador de colores normalizados, con esto se determinó que el agregado fino no contenía impurezas orgánicas que afecten el rendimiento al ser utilizado en hormigón o mortero (INEN, 2010d, pp. 2-3).



Figura AII. 2. Ensayo de contenido orgánico del agregado fino

ANEXO III

PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR LA DOSIFICACION DE HORMIGÓN

Para obtener las cantidades necesarias para elaborar las mezclas de hormigón deseadas se siguió los pasos establecidos en la norma ACI 211.1 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”. En la Tabla AIII.1 se presentan las propiedades físicas del cemento y de los agregados fino y grueso utilizadas para calcular las proporciones de cada material.

Tabla AIII. 1. Propiedades físicas del cemento y de los agregados fino y grueso

Material	Variable	Valor	Unidad
Agregado grueso	Tamaño nominal	1,00	pulgadas
	Densidad aparente suelta	1,41	g/cm ³
	Densidad aparente compactada	1,49	g/cm ³
	Densidad real	2,53	g/cm ³
	Absorción	4,43	%
Agregado Fino	Módulo de finura	2,95	---
	Densidad aparente suelta	1,67	g/cm ³
	Densidad aparente compactada	1,84	g/cm ³
	Densidad real	2,31	g/cm ³
	Absorción	9,79	%
Cemento	Densidad real	2,84	g/cm ³
	Densidad aparente suelta	1,05	g/cm ³
	Densidad aparente compactada	1,32	g/cm ³

Los pasos seguidos fueron los siguientes:

1. Selección del valor del asentamiento.

El valor del asentamiento se seleccionó de acuerdo a la aplicación a la que será destinado el hormigón. En este estudio se escogió un valor de asentamiento para

hormigón que se utilizará en losas, vigas y paredes reforzadas. En la Tabla AIII.2 se exhiben los valores de asentamiento máximo y mínimo para este tipo de hormigón.

Tabla AIII. 2. Asentamientos sugeridos para diversas construcciones

Tipo de Hormigón	Asentamiento (cm)	
	Mínimo	Máximo
Construcciones en masa	2,5	7,6
Pavimentos	5,0	7,6
Columnas de edificios	7,6	15,0
Paredes reforzadas, vigas y losas	7,6	15,0
Muros de subestructuras y zapatas simples	2,5	10,0
Zapatas reforzadas y paredes	5,0	12,7

(American Concrete Institute, 2014, p. 7)

2. Selección del tamaño máximo nominal de los agregados.

Para la selección del tamaño máximo nominal de los agregados se realizó los ensayos de granulometría. De los resultados de estos ensayos se observó que el tamaño máximo que tienen los agregados es un 1 pulgada (2,54 cm), lo cual cumple con lo recomendado para paredes, vigas y columnas que es mínimo de 1,9 cm y máximo 3,8 cm como se puede observar en la Tabla AIII.3.

Tabla AIII. 3. Tamaño máximo de agregado grueso sugerido para diversas construcciones, en cm

Dimensión mínima de la sección (cm)	Construcción			
	Losas ligeramente armadas	Losas fuertemente armadas	Muros sin refuerzos	Columnas, vigas y paredes
76,2 o más	7,6-15,0	3,8 - 7,6	15,0	3,8 - 7,6
30,5 – 73,7	7,6	3,8 - 7,6	7,6	3,8 - 7,6
15,0 – 28	3,8 - 7,6	3,8	3,8	1,9 - 3,8
6,4 – 12,7	1,9-3,8	1,9-2,5	1,9	1,27 - 1,9

(American Concrete Institute, 2014, p. 7)

3. Requerimiento de agua y contenido de aire.

En la Tabla AIII.4 se puede observar que para hormigón con un valor de asentamiento entre 7,6 y 10,2 cm, con agregados de 1 pulgada y sin inclusión de aire, la cantidad de agua requerida es de 193 dm³ por m³ de hormigón y la cantidad aproximada de aire que puede quedar atrapada es de 1,5 %.

Tabla AIII. 4. Cantidad de agua requerida con base en el asentamiento y tamaño de agregado grueso para hormigón sin incorporador de aire

Asentamiento (cm)	Tamaños máximos de agregado grueso (cm) / (in)							
	0,95	1,27	1,9	2,54	3,81	5,08	7,52	15,24
	3/8	½	¾	1	1 1/2	2	3	6
Cantidad de agua en dm ³ por m ³ de hormigón								
7,6 -10,2	228	218	203	193	178	168	158	139
Cantidad de aire aproximada (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

(American Concrete Institute, 2014, p. 8)

4. Selección de la relación agua/cemento.

Se determinó la relación agua/cemento con base en el valor de resistencia a la compresión del hormigón de la Tabla AIII.5. Para este proyecto se seleccionó un valor de esfuerzo de compresión del hormigón de 210 kg/cm² sin inclusión de aire, por lo tanto, el valor de la relación agua/cemento fue de 0,623 L de agua por kg de cemento.

5. Cálculo del contenido de cemento.

Con los valores determinados en los pasos 3 y 4, 193 dm³ por m³ de hormigón y 0,623 L de agua por kg de cemento respectivamente, se calculó el contenido de cemento por m³ de hormigón.

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Cantidad de agua}}{\text{Relación agua/cemento}}$$

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{193 \text{ dm}^3 \text{ de agua/m}^3 \text{ de hormigón}}{0,623 \text{ L de agua/kg de cemento}}$$

$$\text{Contenido de cemento} = 309,8 \text{ kg de cemento/m}^3 \text{ de hormigón}$$

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{309,8 \text{ kg de cemento/m}^3 \text{ de hormigón}}{2840 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ dm}^3}}$$

$$\text{Contenido de cemento} = 109,3 \text{ dm}^3 \text{ de cemento/m}^3 \text{ de hormigón}$$

Tabla AIII. 5. Relación agua-cemento con base en la resistencia a la compresión seleccionada

Relación agua-cemento (L/kg de cemento)	Resistencia al a compresión a los 28 días de curado (kg/cm ²)	
	Hormigón con inclusión de aire	Hormigón sin inclusión de aire
0,800	110	140
0,705	140	180
0,623	180	210
0,530	210	280
0,445	280	350
0,353	325	425

(American Concrete Institute, 2014, p. 9)

6. Estimación del contenido de agregado grueso.

De la Tabla AIII.6 se determinó el volumen aparente de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón en relación al módulo de finura del agregado fino. En la Tabla AIII.1 podemos observar que el módulo de finura es igual a 2,95, lo cual se aproximó a un valor igual 3. Los volúmenes presentados en la Tabla AIII.6 se basan en agregados en condiciones secas y compactadas y son aparentes, por lo tanto, se multiplicó el volumen aparente obtenido de la tabla por la densidad aparente compactada del agregado grueso y se dividió para su densidad real.

Tabla AIII. 6. Volumen aparente de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón

Tamaño máximo de agregado grueso (cm) (in)		Módulo de finura del agregado fino							
		3,0	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
0,95	3/8	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47
1,27	1/2	0,49	0,5	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56
1,9	3/4	0,59	0,6	0,61	0,62	0,63	0,63	0,65	0,66
2,54	1	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,68	0,70	0,71
3,81	1 1/2	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,76	0,77
5,08	2	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,77	0,79	0,80
7,52	3	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,82	0,84	0,85
15,24	6	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,90	0,91

(American Concrete Institute, 2014, p. 12)

$$Volumen\ real = Volumen\ aparente \times \frac{densidad\ aparente\ compactada}{densidad\ real}$$

$$Volumen\ real = 640\ dm^3 \times \frac{1,49\ g/cm^3}{2,54\ g/cm^3} = 375\ dm^3$$

$$Volumen\ real = 375\ dm^3\ de\ agregado\ grueso/m^3\ de\ hormigón$$

7. Estimación del contenido de agregado fino.

Una vez obtenidas las cantidades de agregado grueso, cemento, agua y aire por cada m³ de hormigón, se calculó la cantidad de agregado fino restando estos valores del total que es 1 m³.

$$V_{agregado\ fino} = 1\ m^3\ de\ hormigón - (V_{agua} + V_{aire} + V_{cemento} + V_{agregado\ grueso})$$

$$1\ m^3 = 1000\ dm^3$$

$$V_{agregado\ fino} = 1000\ dm^3 - (193\ dm^3 + 15\ dm^3 + 109,3\ dm^3 + 375\ dm^3)$$

$$V_{agregado\ fino} = 312,7\ dm^3$$

Una vez calculados los valores de todos los materiales que intervienen en la mezcla de hormigón se puede calcular sus pesos multiplicando por sus respectivas densidades y con esto calcular la dosificación del hormigón con relación al peso de cemento.

Tabla AIII. 7. Dosificación de 1 m³ de hormigón convencional de 210 kg/cm² de resistencia a la compresión

Material	Volumen (dm³/m³ de hormigón)	Peso (kg/m³ de hormigón)	Relación en peso (Dosificación)
Agua	193,00	193,00	0,623
Cemento	109,25	309,79	1
Arena	312,67	723,77	2,34
Ripio	375,08	950,99	3,07

ANEXO IV

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LA
ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DEL CATALIZADOR AGOTADO DE
LA UNIDAD DE FCC Y DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
HORMIGÓN Y MORTERO ADICIONADOS CON EL MISMO**

- **Tiempo de fraguado**

Los datos experimentales para el cálculo del tiempo de fraguado se exponen en la Tabla AIV.1.

Tabla AIV. 1. Datos experimentales de tiempo de fraguado

No. de Muestra	Cemento Patrón	Cemento con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
E	122	130	135	120	128
H	247	238	240	230	234
C	33	35	33	28	27
D	24	23	20	23	22

El tiempo de fraguado de las muestras de hormigón fresco fue determinado mediante la ecuación 2.5

$$\left[\left(\frac{H - E}{C - D} \right) \times (C - 25) \right] + E \quad [2.5]$$

Donde:

E = tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25 mm

H = tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25 mm

C = lectura de penetración al tiempo *E*

D = lectura de penetración al tiempo *H*

Ejemplo de cálculo:

$$\left[\left(\frac{247 - 122}{33 - 24} \right) \times (33 - 25) \right] + 122 = 233 \text{ minutos}$$

Tabla AIV. 2. Tiempo de fraguado de cemento patrón y cemento con adición de catalizador agotado

No. de Muestra	Cemento Patrón	Cemento con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
1	236	218	199	183	174
2	232	223	197	185	169
3	230	219	204	189	171
Promedio	233	220	200	186	171



Figura AIV. 1. Aparato de Vicat utilizado en los ensayos de tiempo de fraguado

- **Contenido de aire en hormigón**

Los resultados de los ensayos de contenido de aire de las mezclas de hormigón fresco se exponen en la Tabla AIV.3.

Tabla AIV.3. Contenido de aire de hormigón convencional y hormigón con adición de catalizador agotado

Muestra	Hormigón convencional	Hormigón con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
1	1,5	1,2	1,4	1,9	2,2
2	1,5	1,4	1,6	1,5	2,0
3	1,3	1,4	1,3	1,8	2,1
Promedio	1,4	1,3	1,4	1,7	2,1



Figura AIV.2. Equipo utilizado para medir el contenido de aire en hormigón

- **Calor de hidratación**

Para determinar la capacidad térmica del calorímetro se calculó la elevación de la temperatura con las siguientes ecuaciones:

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0 \quad [\text{AIV.1}]$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20}) \quad [\text{AIV.2}]$$

Donde:

R_0 = elevación de temperatura observada, °C

θ_{20} = temperatura del calorímetro al final del periodo de disolución

θ_0 = temperatura del calorímetro cuando la muestra fue introducida

R = elevación de temperatura corregida, °C

θ_{40} = temperatura del calorímetro al final del período de corrección

Tabla AIV.4. Datos experimentales de elevación de temperatura corregida

Parámetro	θ_0	θ_{20}	R_0	θ_{40}	R
Ensayo 1	18,0	31,5	13,5	21,0	24,0
Ensayo 2	18,0	33,0	15,0	22,0	26,0
Promedio	18,0	32,3	14,3	21,5	25,0

Tabla AIV.5. Datos para determinar la capacidad térmica del calorímetro

Parámetro	W	t	T
Ensayo 1	7,1	53,5	18,0
Ensayo 2	7,2	55,0	18,0
Promedio	7,2	54,25	18,0

La capacidad térmica del calorímetro se calculó con la ecuación AIV.3.

$$C = \frac{w[1072 + 0,4(30 - t) + 0,5(T - t)]}{R} \quad [\text{AIV.3}]$$

Donde:

C = capacidad térmica, $\text{kJ}/^\circ\text{C}$

w = masa de ZnO , g

t = temperatura final del calorímetro, $^\circ\text{C}$ (θ_{20} más temperatura en la cual la lectura del termómetro de la solución es cero)

T = temperatura del ZnO cuando se introduce en el calorímetro, $^\circ\text{C}$ (Temp. ambiente)

R = elevación de temperatura corregida, $^\circ\text{C}$

$$C = \frac{7,2 \times [1072 + 0,4(30 - 54,25) + 0,5(18 - 54,25)]}{25}$$

$$C = 299,05 \text{ J}/^\circ\text{C}$$

Las muestras calorimétricas se determinaron en base calcinada con la ecuación AIV.4.

$$W_i = (A/B)W \quad \text{[AIV.4]}$$

W_i = masa de la muestra calorimétrica en base calcinada

A = masa de la muestra calcinada

B = masa de la muestra antes de la calcinación

W = masa de la muestra calorimétrica

El calor de disolución del cemento seco se calculó con la ecuación AIV.5.

$$H_1 = (R \times C / W_i) - 0,8(T - t_d) \quad \text{[AIV.5]}$$

Donde:

H_1 = calor de disolución del cemento seco

R = elevación de temperatura corregida

C = capacidad térmica

W_i = masa de la muestra en base calcinada

T = temperatura ambiente

t_d = temperatura final del calorímetro en la determinación en cemento seco

Se calculó el calor de disolución de la muestra parcialmente hidratada con la ecuación AIV.6.

$$H_2 = (RC/W_i) - 1,7(T - t_h) - 1,3(t_d - t_h) \quad [\text{AIV.6}]$$

Donde:

H_2 = calor de disolución de la muestra parcialmente hidratada

t_d = temperatura final del calorímetro en la determinación en cemento seco

t_h = temperatura final del calorímetro en la determinación en la muestra parcialmente hidratada

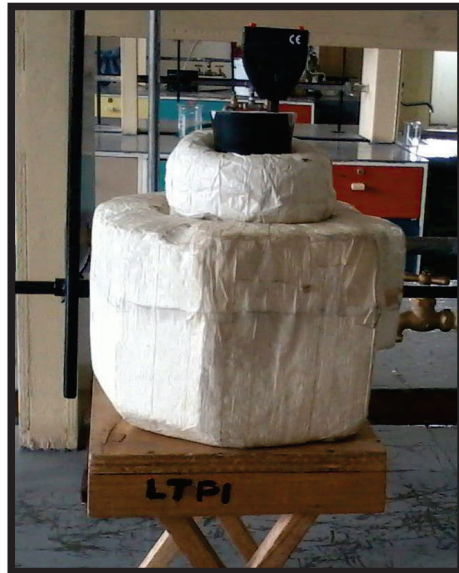


Figura AIV.3. Equipo utilizado para la determinación del calor de hidratación

El calor de hidratación se calculó con la ecuación AIV.7.

$$H = H_1 - H_2 - 0,4(t_h - 25,0) \quad [\text{AIV.7}]$$

Donde:

H = calor de hidratación del cemento calcinado

H_1 = calor de disolución de cemento seco

H_2 = calor de disolución de la muestra parcialmente hidratada

Tabla AIV.6. Datos experimentales del calor de hidratación del cemento patrón

Muestra seca										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	td	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	2,3	2,5	3,1	2,9	15,3	22,7	18,0	28,0	10,0	22,7
Ensayo 2	2,3	2,5	3,0	2,8	15,2	23,5	18,3	28,5	10,2	23,5
Promedio	2,5	2,3	3,0	2,8	15,3	23,1	18,2	28,3	10,1	23,1
Muestra parcialmente hidratada										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	th	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	3,7	4,0	4,2	3,9	15,0	22,0	19,0	28,0	9,0	22,0
Ensayo 2	3,7	4,0	4,1	3,8	18,2	23,0	18,8	30,0	11,2	23,0
Promedio	3,7	4,0	4,2	3,9	16,6	22,5	18,9	29,0	10,1	22,5

Tabla AIV.7. Datos experimentales del calor de hidratación del cemento con 5 % de adición de catalizador agotado

Muestra seca										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	td	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	2,7	2,7	3,1	3,1	15,6	23,0	18,4	28,5	10,1	23,0
Ensayo 2	2,5	2,7	3,1	2,9	14,9	24,0	18,5	28,7	10,2	24,0
Promedio	2,7	2,6	3,1	3,0	15,3	23,5	18,5	28,6	10,2	23,5
Muestra parcialmente hidratada										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	th	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	3,3	3,8	4,2	3,6	15,0	24,0	19,0	29,0	10,0	24,0
Ensayo 2	3,2	3,8	4,2	3,6	12,7	24,5	18,8	28,0	9,2	24,5
Promedio	3,2	3,8	4,2	3,6	13,9	24,3	18,9	28,5	9,6	24,3

Tabla AIV.8. Datos experimentales del calor de hidratación del cemento con 10 % de adición de catalizador agotado

Muestra seca										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	td	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	2,8	3,1	2,9	2,6	19,0	23,6	18,0	30,3	12,3	23,6
Ensayo 2	2,8	3,2	3,0	2,6	17,4	23,8	18,2	29,7	11,5	23,8
Promedio	3,2	2,8	3,0	2,6	18,2	23,7	18,1	30,0	11,9	23,7
Muestra parcialmente hidratada										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	th	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	4,0	4,2	4,1	3,9	21,3	22,0	18,1	30,7	12,6	22,0
Ensayo 2	3,9	4,2	4,2	4,0	22,5	21,5	18,4	31,2	12,8	21,5
Promedio	4,0	4,2	4,2	4,0	21,9	21,8	18,3	31,0	12,7	21,8

Tabla AIV.9. Datos experimentales del calor de hidratación del cemento con 15 % de adición de catalizador agotado

Muestra seca										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	td	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	1,9	2,1	3,1	2,8	16,1	24,7	19,2	30,0	10,8	24,7
Ensayo 2	1,9	2,0	3,0	2,9	17,1	23,4	19,5	30,0	10,5	23,4
Promedio	2,0	1,9	3,0	2,8	16,6	24,1	19,4	30,0	10,7	24,1
Muestra parcialmente hidratada										
Parámetro	A (g)	B (g)	W (g)	Wi (g)	R	th	θo	θ20	Ro	θ40
Ensayo 1	3,3	3,5	4,2	3,9	18,5	21,3	19,0	29,4	10,4	21,3
Ensayo 2	3,2	3,5	4,2	3,8	15,0	22,9	19,3	28,6	9,3	22,9
Promedio	3,2	3,5	4,2	3,8	16,8	22,1	19,2	29,0	9,9	22,1

- Resistencia a la compresión

Tabla AIV.1. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de hormigón convencional

No. de Muestra	Edad de curado											
	3 días			7 días			14 días			28 días		
	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12 524,20	13,07	73,93	12 108,20	23,54	133,21	12 631,80	33,37	188,84	12 863,00	36,86	208,58
2	11 968,00	14,36	81,28	12 909,30	23,57	133,38	11 993,30	34,03	192,57	11 864,00	37,40	211,64
3	12 628,20	12,48	70,64	12 081,20	23,12	130,83	12 067,70	33,52	189,68	11 889,90	36,40	206,00
	Promedio	35,85	75,28	Promedio	63,08	132,47	Promedio	90,65	190,36	Promedio	99,23	208,37

Tabla AIV.2. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de hormigón con 5 % de sustitución de catalizador agotado

No. de Muestra	Edad de curado											
	3 días			7 días			14 días			28 días		
	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12 715,60	14,04	79,45	12 560,30	23,90	135,25	12 554,10	32,62	184,59	12 973,80	36,40	205,98
2	12 386,00	13,79	78,04	12 440,40	24,49	138,58	12 797,80	33,48	189,46	12 942,90	37,12	210,06
3	12 544,60	14,10	79,79	12 980,80	23,44	132,64	12 432,50	32,68	184,93	12 864,30	36,86	208,58
	Promedio	37,66	79,09	Promedio	64,52	135,49	Promedio	88,73	186,33	Promedio	99,15	208,21

Tabla AIV.3. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión con 10 % de sustitución de catalizador agotado

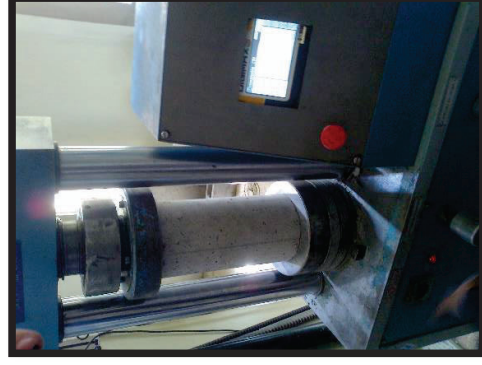
No. de Muestra	Edad de curado											
	3 días			7 días			14 días			28 días		
	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12 347,90	11,73	66,38	11 796,50	21,35	120,82	11 836,90	32,26	182,55	12 610,50	36,46	206,32
2	12 664,00	11,53	65,25	11 818,00	22,76	128,79	12 396,40	33,42	189,12	11 784,90	36,98	209,26
3	12 446,10	11,65	65,93	11 808,60	22,85	129,30	12 112,40	31,82	180,06	11 886,40	36,82	208,36
	Promedio	31,36	65,85	Promedio	60,15	126,31	Promedio	87,58	183,91	Promedio	99,04	207,98

Tabla AIV.4. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión con 15 % de sustitución de catalizador agotado

No. de Muestra	Edad de curado											
	3 días			7 días			14 días			28 días		
	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	12 027,40	9,97	56,42	11 716,60	15,10	85,45	12 487,30	21,17	119,80	12 485,90	27,65	156,47
2	11 671,70	10,23	57,89	12 409,20	12,21	69,09	11 880,80	18,84	106,61	12 676,10	26,16	148,03
3	11 719,20	9,38	53,08	12 400,30	12,42	70,28	12 764,50	18,35	103,84	12 809,50	25,18	142,49
	Promedio	26,57	55,80	Promedio	35,69	74,94	Promedio	52,42	110,08	Promedio	70,95	149,00

Tabla AIV.5. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de hormigón con 20 % de sustitución de catalizador agotado

No. de Muestra	Edad de curado											
	3 días			7 días			14 días			28 días		
	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso (g)	Carga axial (TM)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
1	11 766,20	9,12	51,63	11 797,20	9,88	55,84	11 862,20	16,38	92,69	12 910,50	20,92	118,39
2	12 434,40	8,09	45,76	11 870,70	10,84	61,33	11 932,70	14,52	82,17	12 619,30	19,65	111,18
3	12 270,00	8,32	47,09	11 844,70	9,81	55,52	11 896,00	15,67	88,67	13 729,50	23,69	134,04
	Promedio	23,19	48,70	Promedio	27,90	58,59	Promedio	41,63	87,43	Promedio	54,66	114,79

**Figura AIV.4.** Máquina utilizada para realizar los ensayos de resistencia a la compresión

- **Expansión en autoclave de hormigón**

Tabla AIV.6. Expansión en autoclave de probetas de hormigón

Tipo de Hormigón	Parámetro		
	Longitud final (mm)	Longitud inicial (mm)	ΔL (%)
Hormigón convencional	285,914	284,944	0,340
	285,998	284,868	0,397
	285,806	284,894	0,320
5 %	285,826	284,846	0,344
	285,884	284,858	0,360
	285,814	284,896	0,322
10 %	285,602	284,826	0,272
	285,668	284,840	0,291
	285,646	284,688	0,337
15 %	285,622	284,958	0,233
	285,684	284,942	0,260
	285,546	284,848	0,245
20 %	285,244	284,684	0,197
	285,362	284,796	0,199
	285,302	284,820	0,169

El cambio de longitud de las probetas después del proceso de autoclave se calculó utilizando la ecuación AIV.8

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_i} \times 100 \quad \text{[AIV.8]}$$

Donde

ΔL = Cambio de longitud del espécimen a cualquier edad

L_x = Lectura final del comparador del espécimen

L_i = Lectura inicial del comparador del espécimen

Ejemplo de cálculo:

$$\Delta L = \frac{L_x - L_i}{L_i} \times 100$$

$$\Delta L = \frac{285,914 - 284,944}{284,944} \times 100$$

$$\Delta L = 0,340 \%$$



Figura AIV.5. Autoclave utilizado en los ensayos de determinación de la expansión en autoclave de hormigón y mortero

- **Índice de actividad puzolánica**

La cantidad de catalizador agotado a sustituir por cemento se calculó utilizando la ecuación AIV.9.

$$P = \frac{175 \times \rho}{\rho_1} \quad [\text{AIV.9}]$$

Donde:

P = cantidad de puzolana, en gramos

ρ = densidad de la puzolana

ρ_1 = densidad del cemento Portland

$$P = \frac{175 \times \rho}{\rho_1} = \frac{175 \times 2,57 \text{ g/cm}^3}{2,84 \text{ g/cm}^3} = 158,60 \text{ g de catalizador agotado}$$

Tabla AIV.7. Índice de actividad puzolánica

Muestra	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
	Mortero estándar	Mortero adicionado con catalizador agotado
1	140,26	118,02
2	125,22	112,76
3	138,52	122,14
4	133,10	118,98
5	136,54	117,27
6	134,65	110,91
Promedio	134,72	116,68
Índice de actividad (%)		86,61

El índice se calculó mediante la ecuación 2.6.

$$I_p = \frac{R}{R_1} \times 100 \quad [2.6]$$

Donde:

I_p = Actividad puzolánica en %

R = Resistencia a la compresión de las muestras de mortero

R_1 = Resistencia a la compresión de las muestras de mortero estándar

$$I_p = \frac{R}{R_1} \times 100 = \frac{116,68}{134,72} \times 100 = 86,61 \%$$



Figura AIV.6. Ensayo de índice de actividad puzolánica

- **Expansión en autoclave de mortero**

Tabla AIV.8. Expansión en autoclave de probetas de mortero

Tipo de Mortero	Parámetro		
	Longitud final (mm)	Longitud inicial (mm)	ΔL (%)
Mortero Patrón	285,248	285,194	0,019
	285,236	285,188	0,017
	285,242	285,190	0,018
5 %	285,252	285,202	0,018
	285,264	285,198	0,023
	285,244	285,206	0,013
10 %	285,268	285,228	0,014
	285,278	285,222	0,020
	285,268	285,218	0,018
15 %	285,454	285,402	0,018
	285,472	285,420	0,018
	285,438	285,416	0,008
20 %	285,438	285,398	0,014
	285,456	285,412	0,015
	285,436	285,408	0,010

El cambio de longitud de las probetas después del proceso de autoclave se calculó utilizando la ecuación AIV.8

- **Contenido de aire en el mortero**

Los resultados del contenido de aire de las mezclas de mortero se exhiben en la Tabla AIV.9.

Tabla AIV.9. Resultados de contenido de aire en mortero

Muestra	Mortero patrón	Mortero con varios porcentajes de sustitución			
		5 %	10 %	15 %	20 %
1	1,4	1,5	1,6	1,6	1,8
2	1,3	1,3	1,4	1,7	1,9
3	1,4	1,3	1,5	1,8	2,0
Promedio	1,4	1,4	1,5	1,7	1,8



Figura AIV.7. Equipo utilizado para medir el contenido de aire en el mortero

- **Contracción por secado**

Tabla AIV.10. Resultados de ensayos de contracción por secado

Tipo de Mortero	Edad de curado (días)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)			
		1	7	14	28	60
Mortero Patrón	Probeta 1	286,6	286,4	286,3	286,1	286,0
	Probeta 2	286,8	286,6	286,6	286,5	286,5
	Probeta 3	286,6	286,4	286,4	286,3	286,3
	Promedio	286,67	286,47	286,43	286,30	286,27
	Contracción (%)		-0,0698	-0,0814	-0,1279	-0,1395
5 %	Probeta 1	286,4	286,40	286,4	286,35	286,35
	Probeta 2	286,6	286,55	286,55	286,45	286,40
	Probeta 3	286,7	286,50	286,40	286,25	286,2
	Promedio	286,57	286,48	286,45	286,35	286,32
	Contracción (%)		-0,0640	-0,0756	-0,1105	-0,1221
10 %	Probeta 1	285,2	285,1	285,1	285,0	284,9
	Probeta 2	285,4	285,2	285,0	284,9	284,9
	Probeta 3	285,2	285,1	285,1	285,0	285,0
	Promedio	285,27	285,13	285,05	284,97	284,93
	Contracción (%)		-0,0467	-0,0760	-0,1052	-0,1168
15 %	Probeta 1	285,8	285,7	285,7	285,6	285,4
	Probeta 2	285,6	285,4	285,4	285,3	285,3
	Probeta 3	285,5	285,5	285,4	285,2	285,2
	Promedio	285,63	285,53	285,50	285,37	285,30
	Contracción (%)		-0,0350	-0,0467	-0,0934	-0,1167
20 %	Probeta 1	286,20	286,00	286,00	285,80	285,80
	Probeta 2	286,10	286,10	286,00	285,90	285,80
	Probeta 3	286,30	286,30	286,20	286,10	286,00
	Promedio	286,20	286,13	286,07	285,93	285,87
	Contracción (%)		-0,0233	-0,0466	-0,0932	-0,1165

El cambio de longitud de las probetas se calculó utilizando la ecuación AIV.8



Figura AIV.8. Moldes utilizados en los ensayos de expansión en autoclave, contracción por secado y resistencia a los sulfatos



Figura AIV.9. Moldes utilizados en los ensayos de expansión en autoclave, contracción por secado y resistencia a los sulfatos

- **Resistencia a sulfatos**

Tabla AIV.11. Resultados de ensayos de resistencia a los sulfatos

Tipo de Mortero	Edad de curado (días)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)			
		1	7	14	28	60
Mortero Patrón	Probeta 1	285,2	285,3	285,3	285,4	285,4
	Probeta 2	284,8	285,0	285,1	285,2	285,3
	Probeta 3	283,8	284,2	284,3	284,5	284,5
	Probeta 4	284,6	284,8	284,8	284,9	285,0
	Probeta 5	284,8	285,0	285,0	285,0	285,0
	Probeta 6	284,8	284,8	284,8	285,0	285,0
	Promedio	284,67	284,85	284,88	285,00	285,03
	Expansión (%)		0,0644	0,0761	0,1171	0,1288
5 %	Probeta 1	285,4	285,4	285,5	285,5	285,6
	Probeta 2	284,8	285,0	285,1	285,1	285,2
	Probeta 3	284,8	284,8	284,9	285,0	285,1
	Probeta 4	283,6	284,6	284,6	284,7	284,7
	Probeta 5	285,2	285,0	285,0	285,0	285,0
	Probeta 6	285,8	285,8	285,8	285,9	286,0
	Promedio	284,93	285,10	285,15	285,20	285,27
	Expansión (%)		0,0585	0,0760	0,0936	0,1170
10 %	Probeta 1	286,1	286,3	286,3	286,4	286,4
	Probeta 2	285,8	285,9	286,0	286,0	286,1
	Probeta 3	285,7	285,8	285,9	286,0	286,0
	Probeta 4	286,3	286,5	286,5	286,6	286,7
	Probeta 5	285,8	285,9	286,0	286,2	286,3
	Probeta 6	285,9	286,0	286,1	286,1	286,1
	Promedio	285,93	286,07	286,13	286,22	286,27
	Expansión (%)		0,0466	0,0699	0,0991	0,1166

Tabla AIV.20. Resultados de ensayos de resistencia a los sulfatos (continuación...)

Tipo de Mortero	Edad de curado (días)	Longitud inicial (mm)	Longitud final (mm)			
		1	7	14	28	60
15 %	Probeta 1	284,4	284,6	284,7	284,7	284,8
	Probeta 2	284,4	284,5	284,5	284,6	284,6
	Probeta 3	283,8	284,0	284,0	284,1	284,2
	Probeta 4	284,2	284,2	284,4	284,4	284,4
	Probeta 5	284,0	284,1	284,2	284,3	284,3
	Probeta 6	283,3	283,4	283,4	283,5	283,6
	Promedio	284,02	284,13	284,20	284,27	284,32
	Expansión (%)			0,0411	0,0646	0,0880
20 %	Probeta 1	284,2	284,3	284,5	284,5	284,5
	Probeta 2	284,4	284,4	284,5	284,6	284,7
	Probeta 3	284,4	284,5	284,6	284,6	284,6
	Probeta 4	283,8	284,0	284,1	284,2	284,2
	Probeta 5	283,9	284,0	284,0	284,0	284,0
	Probeta 6	284,1	284,2	284,2	284,3	284,4
	Promedio	284,13	284,23	284,32	284,37	284,40
	Expansión (%)			0,0352	0,0645	0,0821

El cambio de longitud de las probetas se calculó utilizando la ecuación AIV.8



Figura AIV.10. Ensayo de resistencia a los sulfatos

ANEXO V

DISEÑO DE PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO

- **Balance de masa en el horno de clinkerización**

Las reacciones de formación del clíinker ocurren en diferentes secciones del horno, que son identificadas de acuerdo a la temperatura. Estas secciones se ilustran en la Figura AIV.1.

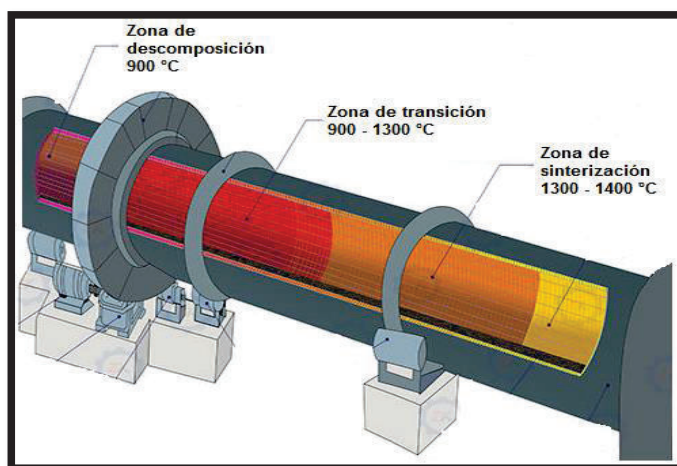


Figura AV.1. Secciones del horno rotatorio
(Boateng, 2008, pp. 275-278)

Tabla AV.1. Composición de clíinker

Compuesto	Composición	kg/día
Alita (C ₃ S)	0,62	7 951,50
Belita (C ₂ S)	0,15	1 923,75
Aluminato tricálcico (C ₃ A)	0,1	1 282,50
Ferroaluminato tetracálcico (C ₄ AF)	0,1	1 282,50
Cal libre	0,01	128,25
Comp. Min. (Mg, Na, K, S)	0,02	256,50

(Holcim, 2011b, p. 3)

Producción de Alita/Consumo de Belita



Para producir alita se requiere 1 mol de belita y 1 mol de óxido de calcio de acuerdo con la reacción:



Que se puede representar de la siguiente manera:



Las cantidades de belita y óxido de calcio necesarias para producir 7 951,5 kg por día de alita se calcularon por estequiometría.

Cantidad de óxido de calcio necesaria para producir Alita

$$7\,951,5 \text{ kg/día de } \text{C}_3\text{S} \times \frac{1 \text{ kgmol } \text{C}_3\text{S}}{228,3 \text{ kg } \text{C}_3\text{S}} \times \frac{1 \text{ kgmol } \text{CaO}}{1 \text{ kgmol } \text{C}_3\text{S}} = 34,83 \text{ kgmol/día de } \text{CaO}$$

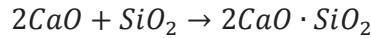
$$\frac{34,83 \text{ kgmol}}{\text{día de } \text{CaO}} \times \frac{56,08 \text{ kg } \text{CaO}}{\text{kgmol } \text{CaO}} = 1\,953,22 \text{ kg/día de } \text{CaO}$$

Cantidad de Belita necesaria para producir Alita

$$7\,951,5 \text{ kg/día de } \text{C}_3\text{S} \times \frac{1 \text{ kgmol } \text{C}_3\text{S}}{228,3 \text{ kg } \text{C}_3\text{S}} \times \frac{1 \text{ kgmol } \text{C}_2\text{S}}{1 \text{ kgmol } \text{C}_3\text{S}} = 34,83 \text{ kgmol/día de } \text{C}_2\text{S}$$

$$\frac{34,83 \text{ kgmol}}{\text{día de } \text{C}_2\text{S}} \times \frac{172,22 \text{ kg } \text{C}_2\text{S}}{\text{kgmol } \text{C}_2\text{S}} = 5\,998,28 \text{ kg/día de } \text{C}_2\text{S}$$

Para producir Belita se requiere 1 mol de óxido de silicio y 2 moles de óxido de calcio de acuerdo con la reacción:



Que se puede representar de la siguiente manera:



Las cantidades de óxido de silicio y óxido de calcio necesarias para producir 5 998,28 kg de Belita por día se calcularon por estequiometría.

$$5\,998,28 \text{ kg/día de } C_2S \times \frac{\text{kgmol } C_2S}{172,22 \text{ kg } C_2S} \times \frac{2 \text{ kgmol } CaO}{1 \text{ kgmol } C_2S} = 69,66 \text{ kgmol/día de } CaO$$

$$\frac{69,66 \text{ kgmol}}{\text{día de } CaO} \times \frac{56,08 \text{ kg } CaO}{\text{kgmol } CaO} = 3\,906,44 \text{ kg/día de } CaO$$

$$5\,998,28 \text{ kg/día de } C_2S \times \frac{\text{kgmol } C_2S}{172,22 \text{ kg } C_2S} \times \frac{1 \text{ kgmol } SiO_2}{1 \text{ kgmol } C_2S} = 34,83 \text{ kgmol/día de } SiO_2$$

$$\frac{34,83 \text{ kgmol}}{\text{día de } SiO_2} \times \frac{60,06 \text{ kg } SiO_2}{\text{kgmol } SiO_2} = 2\,091,84 \text{ kg/día de } SiO_2$$

Producción de Belita presenta en la mezcla final



Las cantidades de óxido de silicio y óxido de calcio necesarias para producir 2 700 kg por día de Belita se calcularon por estequiometría

$$1\,923,8 \text{ kg/día de } C_2S \times \frac{\text{kgmol } C_2S}{172,22 \text{ kg } C_2S} \times \frac{2 \text{ kgmol } CaO}{1 \text{ kgmol } C_2S} = 22,34 \text{ kgmol/día de } CaO$$

$$\frac{22,34 \text{ kgmol}}{\text{día de } CaO} \times \frac{56,08 \text{ kg } CaO}{\text{kgmol } CaO} = 1\,252,86 \text{ kg/día de } CaO$$

$$1\,923,8 \text{ kg/día de } C_2S \times \frac{\text{kgmol } C_2S}{172,22 \text{ kg } C_2S} \times \frac{1 \text{ kgmol } SiO_2}{1 \text{ kgmol } C_2S} = 11,17 \text{ kgmol/día de } SiO_2$$

$$\frac{11,17 \text{ kgmol}}{\text{día de } SiO_2} \times \frac{60,06 \text{ kg } SiO_2}{\text{kgmol } SiO_2} = 670,89 \text{ kg/día de } SiO_2$$

La cantidad de óxido de calcio y óxido de silicio total para la producción de Belita corresponde a la suma de la cantidad de óxido de calcio necesaria para producir Belita que interviene en la producción de Alita más la cantidad de óxido de calcio necesaria para producir Belita que estará presente en la mezcla final de clínker.

$$C_2S_{total} = 5\,998,28 \text{ kg/día} + 1\,923,8 \text{ kg/día}$$

$$C_2S_{total} = 7\,922,03 \text{ kg/día de } C_2S$$

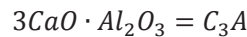
$$CaO_{total \text{ Belita}} = 3\,906,44 \text{ kg/día de } CaO + 1\,252,86 \text{ kg/día de } CaO$$

$$CaO_{total \text{ Belita}} = 5\,159,30 \text{ kg/día de } CaO$$

$$SiO_{2total \text{ Belita}} = 2\,091,84 \text{ kg/día de } SiO_2 + 670,89 \text{ kg/día de } SiO_2$$

$$SiO_{2total \text{ Belita}} = 2\,762,73 \text{ kg/día de } SiO_2$$

Producción de Aluminato tricálcico



$$\frac{1\,282,5 \text{ kg}}{\text{día de } C_3A} \times \frac{\text{kgmol } C_3A}{270,18 \text{ kg } C_3A} \times \frac{1 \text{ kgmol de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3}{3 \text{ kgmol } C_3A} = \frac{1,58 \text{ kgmol}}{\text{día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3}$$

$$\frac{1,58 \text{ kgmol}}{\text{día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} \times \frac{586,22 \text{ kg } 5CaO \cdot 3Al_2O_3}{\text{kgmol } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} = 927,56 \text{ kg/día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3$$

$$\frac{1,58 \text{ kgmol}}{\text{día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} \times \frac{3 \text{ kgmol } CaO \cdot Al_2O_3}{1 \text{ kgmol de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} \times \frac{1 \text{ kgmol } Al_2O_3}{1 \text{ kgmol de } CaO \cdot Al_2O_3} = \frac{4,75 \text{ kgmol}}{\text{día de } Al_2O_3}$$

$$\frac{4,75 \text{ kgmol}}{\text{día de } Al_2O_3} \times \frac{101,94 \text{ kg } Al_2O_3}{\text{kgmol } Al_2O_3} = 483,89 \text{ kg/día de } Al_2O_3$$

Cantidad de óxido de calcio necesaria para producir aluminato tricálcico

$$1\,282,5 \text{ kg/día de } C_3A \times \frac{\text{kgmol } C_3A}{270,18 \text{ kg } C_3A} \times \frac{4 \text{ kgmol de } CaO}{3 \text{ kgmol } C_3A} = 6,33 \text{ kgmol/día de } CaO$$

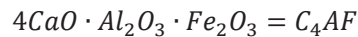
$$1,58 \text{ kgmol/día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3 \times \frac{2 \text{ kgmol } CaO}{1 \text{ kgmol de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} = 3,16 \text{ kgmol/día de } CaO$$

$$4,75 \text{ kgmol/día de } Al_2O_3 \times \frac{1 \text{ kgmol } CaO}{1 \text{ kgmol } Al_2O_3} = 4,75 \text{ kgmol/día de } CaO$$

$$\text{kgmol/día de } CaO = 6,33 + 3,16 + 4,75 = 14,24 \text{ kgmol/día de } CaO$$

$$\frac{14,24 \text{ kgmol}}{\text{día de } CaO} \times \frac{56,08 \text{ kg } CaO}{\text{kgmol } CaO} = 798,61 \text{ kg/día de } CaO$$

Producción de Ferroaluminato tetracálcico



Cantidad de óxido férrico necesaria para producir Ferroaluminato tetracálcico

$$1\,282,5 \text{ kg/día de } C_4AF \times \frac{\text{kgmol } C_4AF}{485,96 \text{ kg } C_4AF} \times \frac{3 \text{ kgmol } 2CaO \cdot Fe_2O_3}{3 \text{ kgmol } C_4AF} = 2,64 \text{ kgmol/día}$$

$$\frac{2,64 \text{ kgmol}}{\text{día de } 2CaO \cdot Fe_2O_3} \times \frac{271,86 \text{ kg } 2CaO \cdot Fe_2O_3}{\text{kgmol } 2CaO \cdot Fe_2O_3} = 717,47 \text{ kg/día de } 2CaO \cdot Fe_2O_3$$

$$\frac{2,64 \text{ kgmol}}{\text{día de } 2CaO \cdot Fe_2O_3} \times \frac{1 \text{ kgmol } CaO \cdot Fe_2O_3}{1 \text{ kgmol de } 2CaO \cdot Fe_2O_3} \times \frac{1 \text{ kgmol } Fe_2O_3}{1 \text{ kgmol de } CaO \cdot Fe_2O_3} = \frac{2,64 \text{ kgmol}}{\text{día de } Fe_2O_3}$$

$$\frac{2,64 \text{ kgmol}}{\text{día de } Fe_2O_3} \times \frac{159,70 \text{ kg } Fe_2O_3}{\text{kgmol } Fe_2O_3} = 421,47 \text{ kg/día de } Fe_2O_3$$

Cantidad de óxido de aluminio necesaria para producir Ferroaluminato tetracálcico

$$\frac{1\ 282,5\ \text{kg}}{\text{día de } C_4AF} \times \frac{\text{kgmol } C_4AF}{485,96\ \text{kg } C_4AF} \times \frac{1\ \text{kgmol } 5CaO \cdot 3Al_2O_3}{3\ \text{kgmol } C_4AF} = \frac{0,88\ \text{kgmol}}{\text{día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3}$$

$$\frac{0,88\ \text{kgmol}}{\text{día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} \times \frac{586,22\ \text{kg } 5CaO \cdot 3Al_2O_3}{\text{kgmol } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} = 515,70\ \text{kg/día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3$$

$$\frac{0,88\ \text{kgmol}}{\text{día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} \times \frac{3\ \text{kgmol } CaO \cdot Al_2O_3}{1\ \text{kgmol de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} \times \frac{1\ \text{kgmol } Al_2O_3}{1\ \text{kgmol de } CaO \cdot Al_2O_3} = \frac{2,64\ \text{kgmol}}{\text{día de } Al_2O_3}$$

$$\frac{2,64\ \text{kgmol}}{\text{día de } Al_2O_3} \times \frac{101,94\ \text{kg } Al_2O_3}{\text{kgmol } Al_2O_3} = 269,03\ \text{kg/día de } Al_2O_3$$

Cantidad de óxido de calcio necesaria para producir Ferroaluminato tetracálcico

$$1\ 282,5\ \text{kg/día de } C_4AF \times \frac{\text{kgmol } C_4AF}{485,96\ \text{kg } C_4AF} \times \frac{1\ \text{kgmol de } CaO}{3\ \text{kgmol } C_4AF} = 0,88\ \text{kgmol/día de } CaO$$

$$2,64\ \text{kgmol/día de } 2CaO \cdot Fe_2O_3 \times \frac{1\ \text{kgmol } CaO}{1\ \text{kgmol de } 2CaO \cdot Fe_2O_3} = 2,64\ \text{kgmol/día de } CaO$$

$$2,64\ \text{kgmol/día de } Fe_2O_3 \times \frac{1\ \text{kgmol } CaO}{1\ \text{kgmol } Fe_2O_3} = 2,64\ \text{kgmol/día de } CaO$$

$$0,88\ \text{kgmol/día de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3 \times \frac{2\ \text{kgmol } CaO}{1\ \text{kgmol de } 5CaO \cdot 3Al_2O_3} = 1,76\ \text{kgmol/día de } CaO$$

$$2,64\ \text{kgmol/día de } Al_2O_3 \times \frac{1\ \text{kgmol } CaO}{1\ \text{kgmol } Al_2O_3} = 2,64\ \text{kgmol/día de } CaO$$

$$\text{kgmol/día de } CaO = 0,88 + 2,64 + 2,64 + 1,76 + 2,64 = 10,56\ \text{kgmol/día de } CaO$$

$$\frac{10,56\ \text{kgmol}}{\text{día de } CaO} \times \frac{56,08\ \text{kg } CaO}{\text{kgmol } CaO} = 592,00\ \text{kg/día de } CaO$$

Cantidad de óxido de calcio total

La cantidad de óxido de calcio total requerida para el proceso de clinkerización corresponde a la suma de las cantidades de óxido de calcio necesarias para producir Alita, Belita, Aluminato tricálcico y Ferroaluminato tetracálcico más la cantidad de cal libre que estará presente en la composición final del clínker.

$$CaO_{total} = CaO_{prod. Alita} + CaO_{total Belita} + CaO_{prod. Aluminato tricálcico} \\ + CaO_{prod. Ferroaluminato tetracálcico} + CaO_{libre}$$

$$CaO_{libre} = 1\% \text{ de la composición de clínker}$$

$$CaO_{libre} = 0,01 * 12\ 825 = 128,25 \text{ kg/día}$$

$$CaO_{total} = 1\ 953,22 \text{ kg} + 5\ 159,30 \text{ kg} + 798,61 \text{ kg} + 592,00 \text{ kg} + 128,25 \text{ kg}$$

$$CaO_{total} = 8\ 631,38 \text{ kg/día de CaO}$$



$$8\ 631,38 \text{ kg/día de CaO} \times \frac{\text{kgmol CaO}}{56,08 \text{ kg CaO}} \times \frac{1 \text{ kgmol CaCO}_3}{1 \text{ kgmol CaO}} = 153,91 \text{ kgmol/día de CaCO}_3$$

$$\frac{153,91 \text{ kgmol}}{\text{día de CaCO}_3} \times \frac{100,09 \text{ kg CaCO}_3}{\text{kgmol CaCO}_3} = 15\ 405,05 \text{ kg/día de CaCO}_3$$

$$8\ 631,38 \text{ kg/día de CaO} \times \frac{\text{kgmol CaO}}{56,08 \text{ kg CaO}} \times \frac{1 \text{ kgmol CO}_2}{1 \text{ kgmol CaO}} = 153,91 \text{ kgmol/día de CO}_2$$

$$\frac{153,91 \text{ kgmol}}{\text{día de CO}_2} \times \frac{44,01 \text{ kg CO}_2}{\text{kgmol CO}_2} = 6\ 773,67 \text{ kg/día de CO}_2$$

- Localización de la planta

Tabla AV.2. Método cualitativo para determinar la localización de la planta

Factor	Ponderación	Esmeraldas (Esmeraldas)		San Antonio (Guayas)		Apuela (Cotacachi)	
		Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada
Disponibilidad de materia prima	35	8	28,0	7	24,5	9	31,5
Disponibilidad de energía eléctrica	25	9	22,5	9	22,5	9	22,5
Suministro de agua	15	9	13,5	9	13,5	9	13,5
Clima	15	9	13,5	9	13,5	10	15,0
Facilidad de transporte	10	8	8,0	7	7,0	9	9,0
Suma	100	---	85,5	---	81,0	---	91,5

•

HOJAS DE ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS

Tabla AV.3. Especificaciones de la trituradora

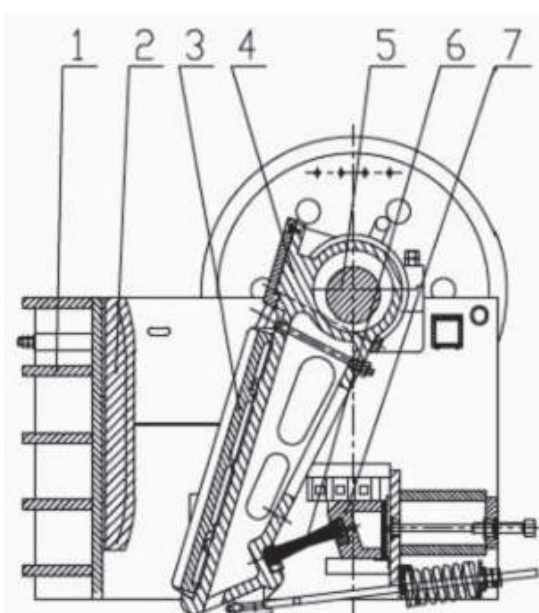
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N° 1		
Equipo: Trituradora (T-101)		
Marca: Vipeak Heavy Industry	Modelo: PE-150 x 250	Material de construcción: AISI 304 Número en planta: 1
Medidas: Longitud: 0,76 m Altura: 0,82 m Ancho: 0,67 m	Parámetros de diseño: Capacidad: 1 - 3 t/h Tamaño de alimentación: 200 mm Tamaño de descarga: 10 – 40 mm Potencia: 5,5 kW	
Principio de funcionamiento: La materia prima ingresa por la tolva cerrada y pasa a la cámara de trituración, la misma que es de forma cuneiforme. La trituración se lleva a cabo entre los brazos fijo y triturador que se mueven por un eje excéntrico. Si después de este proceso el tamaño de la materia prima disminuye, pasa a un recipiente para ser recolectado.		
Modalidad de operación: Continuo		
Esquema:		
		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Armazón 2. Placa de mandíbula fija 3. Placa de mandíbula móvil 4. Mandíbula móvil 5. Eje excéntrico 6. Placa de protección 7. Asiento de ajuste 		

Tabla AV.4. Especificaciones del molino de bolas

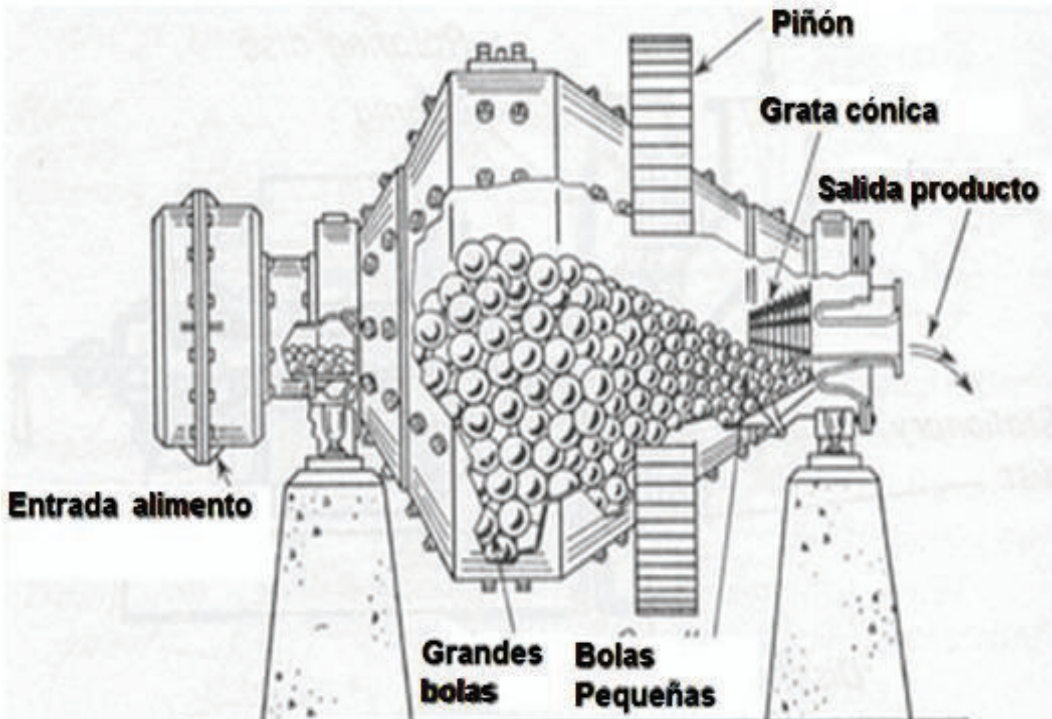
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N° 2		
Equipo: Molino de bolas (M-101)		
Marca: Metso	Modelo: MQY 2122	Material de construcción: AISI 304 Número en planta: 2
Medidas: Diámetro: 1,2 m Altura: 4,5 m	Parámetros de diseño: Capacidad: 1,4 - 30 t/h Tamaño de alimentación: 25 mm Tamaño de descarga: 70 – 20 μ m Velocidad: 30 RPM Potencia: 55 kW	
Principio de funcionamiento: Las materias primas a moler se trituran en la pista giratoria de molienda. La molienda se realiza por la aplicación de una fuerza de compresión, con una fuerza de cizallamiento, este efecto se produce gracias al contacto entre las bolas y las paredes del molino.		
Modalidad de operación: Continuo		
Esquema:  <p>El diagrama ilustra el funcionamiento interno de un molino de bolas. Se muestra la 'Entrada alimento' a la izquierda. El interior del molino está repleto de 'Grandes bolas' y 'Bolas Pequeñas'. En la parte superior, se indica el 'Piñón' (el eje de rotación). A la derecha, se muestra la 'Grata cónica' que filtra el producto, con una 'Salida producto' indicada por una flecha. El molino está montado sobre un soporte con un eje de transmisión.</p>		

Tabla AV.5. Especificaciones del precalentador

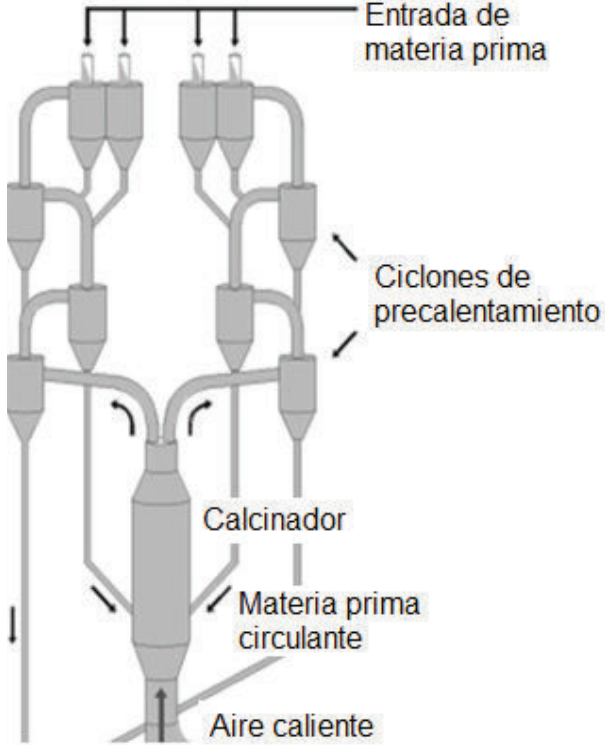
HOJA DE ESPECIFICACIÓN N° 3		
Equipo: Precalentador (HE-101)		
Marca: Henan Zhengzhou	Modelo: ZS 165-5	Material de construcción: AISI 304 Número en planta: 1
Medidas: Diámetro: 2,5 m Altura: 20 m	Parámetros de diseño: Capacidad: 1,5 t/h Temperatura de calcinación: 800 °C Potencia: 55 kW	
Principio de funcionamiento: Dentro del precalentador se produce la emisión de calor por convección, por donde ingresa la materia prima (alimentación) se encuentran unos sellos para evitar que ingresa aire frío en el equipo y no se logre alcanzar la temperatura de calcinación adecuada: 800 °C.		
Modalidad de operación: Continuo		
Esquema:  <p>El diagrama ilustra el flujo de material y aire en un precalentador. En la parte superior, se indica la 'Entrada de materia prima' que se distribuye a través de dos columnas de ciclones de precalentamiento. El material luego fluye hacia un 'Calcinador' central. En la parte inferior del calcinador, se indica 'Aire caliente' que entra hacia arriba. El material precalentado, etiquetado como 'Materia prima circulante', fluye de vuelta hacia los ciclones de precalentamiento.</p>		

Tabla AV.6. Especificaciones del horno rotatorio

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N° 4		
Equipo: Horno rotatorio (F-101)		
Marca: Henan Zhengzhou	Modelo: ZQ75-50	Material de construcción: AISI 304 Número en planta: 1
Medidas: Diámetro: 1,6 m Longitud: 32 m	Parámetros de diseño: Capacidad: 2 t/h Temperatura de calcinación: 1450 °C Potencia: 18,5 kW	
Principio de funcionamiento:		
<p>La materia prima se introduce por la cola del horno rotatorio, a través de una rampa, en la cámara de gas. Como la carcasa del horno se inclina y gira levemente, el material se moverá a lo largo de ésta. El calor será transferido a la materia prima por radiación del flujo de aire caliente.</p>		
Modalidad de operación: Continuo		
Esquema:		
<p>El diagrama ilustra un horno rotatorio inclinado. A la izquierda, se muestra la entrada de combustible y aire primario. El horno está inclinado y gira sobre rodillos de rodadura. En la parte superior, se indica la salida del horno y la formación de costra y anillos. En la parte inferior, se muestra un enfriador con un sopla de aire frío. A la derecha, se indica la alimentación de gases residuales del horno.</p>		

Tabla AV.7. Especificaciones del enfriador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N° 5		
Equipo: Enfriador (HE-102)		
Marca: Henan Zhengzhou	Modelo: ZQ75-50	Material de construcción: AISI 304 Número en planta: 1
Medidas: Diámetro: 1 m Longitud: 15 m	Parámetros de diseño: Capacidad: 2 t/h Velocidad: 5 RPM Potencia: 7.5 kW Volumen: 12 m ³ Temperatura: 150 °C	
Principio de funcionamiento: El clínker que sale del horno rotatorio ingresa al enfriador por la parte superior, mediante inyección de aire frío, la temperatura disminuirá hasta 150 ° C.		
Modalidad de operación: Continuo		
Esquema:		
<p style="text-align: center;">Transporta el clínker caliente mediante suministro de aire</p> <p>Horno rotatorio Aire secundario Clínker Transporte de clínker</p> <p>Ventilador principal V1 Q1 P2 P3 V2 V3 V4 V5 V6</p> <p>Armazón fijo, característica principal del enfriador Rejilla móvil, transporta el clínker hacia adelante Ventiladores, junto a la rejilla móvil</p>		

ANEXO VI

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN Y MORTERO CON CATALIZADOR AGOTADO DE LA UNIDAD FCC

El análisis económico del proyecto y los indicadores que determinan su rentabilidad se detallan en sección 3.7. El flujo de fondos del proyecto para 10 años se expone en la Tabla AVI.1.

Tabla AVI.1. Flujo de fondos del proyecto

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos por Ventas		876 000,00	876 000,00	876 000,00	876 000,00	876 000,00
Costos Variables		-566 084,00	-566 084,00	-566 084,00	-566 084,00	-566 084,00
Costos Fijos		-123 355,00	-123 355,00	-123 355,00	-123 355,00	-123 355,00
Intereses		-33 829,00	-31 611,00	-29 192,00	-26 552,00	-23 673,00
Utilidad Bruta		152 729,00	154 947,00	157 367,00	160 006,00	162 885,00
Depreciación		-25 900,00	-25 900,00	-25 900,00	-25 900,00	-25 900,00
Utilidades antes de Impuestos		126 829,00	129 047,00	131 467,00	134 106,00	136 985,00
Impuestos (20 %)		25 365,00	25 809,00	26 293,00	26 821,00	27 397,00
Utilidad Neta		101 463,00	103 237,00	105 173,00	107 285,00	109 588,00
Depreciación		25 900,00	25 900,00	25 900,00	25 900,00	25 900,00
Inversión	-414 357,00					
Capital de Trabajo	-344 720,00					
Valor de Desecho						
Préstamo	372 575,00					
Amortización del préstamo		-24 429,00	-26 647,00	-29 067,00	-31 706,00	-34 585,00
Flujo Neto	-386 502,00	102 933,00	102 490,00	102 006,00	101 478,00	100 902,00

Tabla AVI.1. Flujo de fondos del proyecto (continuación...)

Año	6	7	8	9	10
Ingresos por Ventas	876 000,00	876 000,00	876 000,00	876 000,00	876 000,00
Costos Variables	-566 085,00	-566 085,00	-566 085,00	-566 085,00	-566 085,00
Costos Fijos	-123 356,00	-123 356,00	-123 356,00	-123 356,00	-123 356,00
Intereses	-20 533,00	-17 108,00	-13 371,00	-9 296,00	-4 850,00
Utilidad Bruta	166 026,00	169 451,00	173 188,00	177 264,00	181 710,00
Depreciación	-25 900,00	-25 900,00	-25 900,00	-25 900,00	-25 900,00
Utilidades antes de Impuestos	140 126,00	143 551,00	147 288,00	151 364,00	155 810,00
Impuestos (20 %)	28 025,00	28 710,00	29 458,00	30 273,00	31 162,00
Utilidad Neta	112 101,00	114 841,00	117 830,00	121 091,00	124 648,00
Depreciación	25 900,00	25 900,00	25 900,00	25 900,00	25 900,00
Inversiones					
Capital de Trabajo					
Valor de Desecho					1 389 005,00
Préstamo					
Amortización del préstamo	-37 726,00	-41 151,00	-44 888,00	-48 964,00	-53 410,00
Flujo Neto	100 275,00	99 590,00	98 842,00	98 027,00	1 486 143,00