

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA FABRICACIÓN DE MAMPUESTOS DE USO PEATONAL CON CENIZAS DE INCINERACIÓN PROVENIENTES DE LA EMPRESA GPOWERGROUP S.A.

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

CRISTHIAN GONZALO BENAVIDES CEDEÑO
gonzalo_bc7@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, octubre 2015

Escuela Politécnica Nacional (2015)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Cristhian Gonzalo Benavides Cedeño, 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.

Cristhian Gonzalo Benavides Cedeño

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Cristhian Gonzalo Benavides Cedeño, bajo nuestra supervisión.

Ing. Germán Luna Hermosa, MBA.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Lucía Montenegro Aguas, MSc
CODIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero de GPOWERGROUP S.A.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por escuchar mis oraciones en momentos difíciles, ser mi tranquilidad y mi paciencia durante esta etapa de mi vida.

A mis padres, Delfina y Gonzalo, por ser mi ejemplo de enseñanza, perseverancia, actitud, dedicación, valores, amor, por formarme como persona y ser el pilar de mi vida. Gracias sobre todo, por respaldarme en cada cosa que quise hacer al igual que decirme NO cuando era necesario.

A mi ñaña Majo, gracias gemela por todo lo que hemos vivido en esta búsqueda de salir adelante y ser profesionales. Otra etapa culminada, pero lo mejor de todo JUNTOS.

A Michelle, por tu apoyo, respaldo, ayuda y ser esa compañía que uno necesita al final del día. Gracias por todos los momentos compartidos durante este tiempo y por demostrarme tu cariño siempre, eres una gran mujer y te mereces lo mejor.

A Paola, Andrés y GPOWERGROUP S.A., por la confianza, apoyo y la oportunidad de realizar este proyecto.

Al Ingeniero Germán Luna por su dirección, apoyo y conocimientos desde el inicio hasta el final de este proyecto, por brindarme la mano sin conocerme, gracias sobre todo por su confianza al darme ese SÍ para iniciar este proyecto.

A Inge Lucy, por su tiempo, paciencia y codirección. Ha sido grato para mí que sea parte de este proyecto.

Al Ingeniero Marcelo Salvador, por su tiempo y ayuda. Gracias Inge por el acolite.

A mis amigos Fer, Carlita, Daniel, Andrés, Rashu y Diego, gracias por su amistad y lo vivido desde mis inicios en el prepo hasta la actualidad.

A mi pequeño amigo Herman, te debo mucho y eres parte de que iniciara con este proyecto. A mis amigos: Daniel C, Miguel, Carlos, Champi, Maury, Fabricio, Inge Miguel, José, Raúl, Ily, Anilú, Denisse, Daya, Dianita, Jenny y cada uno de los compañeros de clase con los que tuve la oportunidad de pasar gratas vivencias, gracias por compartir su amistad, sus momentos y hacer de mi estancia en la universidad lo máximo.

A mi socio Wala, por esos días de albañilería y de trabajo duro. Gracias por ser un gran amigo.

Al Inge Martínez, Don Santana y cada una de las personas que de alguna manera colaboraron para que este proyecto salga adelante.

DEDICATORIA

*A las tres mujeres de mi vida: mami Meche (†), Delfina, y
Majo, gracias por todo.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xviii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Cenizas de la incineración de residuos sólidos y su aplicación	1
1.1.1. Tratamiento de residuos sólidos: procesos térmicos	1
1.1.1.1. Pirólisis	1
1.1.1.2. Gasificación	5
1.1.1.3. Incineración	7
1.1.2. Tratamientos para la disposición final de la ceniza generada en el proceso de incineración y sus aplicaciones	20
1.1.2.1. Depósito en vertedero	21
1.1.2.2. Tratamiento físico-químico	22
1.1.2.3. Vitrificación	23
1.1.2.4. Estabilización - Solidificación	24
1.1.3. Aplicaciones de las cenizas provenientes de procesos térmicos	31
1.1.3.1. Valoración en cementera	31
1.1.3.2. Obtención de hormigón y materiales de construcción	31
1.2. Elaboración de mampuestos	33
1.2.1. Consideraciones para la elaboración de mampuestos de hormigón	33
1.2.1.1. Dosificación	33
1.2.1.2. Modelo de producción	35
1.2.1.3. Etapas en la elaboración de adoquines	37
1.2.2. Calidad del hormigón y proceso de encapsulación	38
1.2.2.1. Ensayos físicos	38
1.2.2.2. Ensayo químico TCLP (Toxicity characteristics leaching procedure)	40
1.2.3. Normativa ambiental actual para residuos peligrosos	41
2. PARTE EXPERIMENTAL	43
2.1. Caracterización física y química de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de tratamiento de desechos sólidos de la empresa GPOWERGROUP S.A	43
2.1.1. Muestreo de la ceniza	43
2.1.2. Composición mineralógica	43
2.1.3. Características del lixiviado de la ceniza en estado libre	44
2.1.4. Granulometría	45

2.1.5.	Determinación de la densidad real, masa unitaria (densidad aparente) y porcentaje de vacío	45
2.1.6.	Contenido de humedad de la ceniza	47
2.2.	Determinación del porcentaje óptimo de sustitución de ceniza como agregado fino para hormigón en la fabricación de mampuestos mediante la evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón con cenizas respecto al hormigón convencional	48
2.2.1.	Dosificación del hormigón convencional y con ceniza	48
2.2.2.	Evaluación del proceso de encapsulamiento con hormigón	49
2.2.2.1.	Evaluación de los ensayos en hormigón fresco	50
2.2.2.2.	Evaluación de los ensayos en hormigón endurecido	51
2.3.3.	Evaluación del residuo encapsulado a partir de la lixiviación de metales pesados	59
2.3.	Diseño de la planta piloto para la fabricación de mampuestos	60
2.4.	Evaluación económica de la planta piloto	62
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
3.1.	Caracterización física y química de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A	63
3.1.1.	Determinación de la composición mineralógica	63
3.1.2.	Determinación de la concentración de metales pesados del lixiviado de la ceniza en estado libre	65
3.1.3.	Determinación del d_{80}	67
3.1.4.	Determinación de la densidad real, densidad aparente y porcentaje de vacíos de la ceniza	69
3.1.5.	Determinación de la humedad	70
3.2.	Dosificación de hormigón convencional y hormigón con ceniza	71
3.3.	Evaluación del proceso de encapsulación con hormigón	75
3.3.1.	Resultados de ensayos en hormigón fresco	75
3.3.1.1.	Asentamiento	75
3.3.1.2.	Temperatura del hormigón	78
3.3.1.3.	Contenido de aire	79
3.3.2.	Resultados de ensayos en hormigón endurecido	80
3.3.2.1.	Resistencia a la Compresión	80
3.3.2.2.	Módulo de elasticidad	84
3.3.2.3.	Resistencia a la flexión	87
3.3.2.4.	Resistencia por tracción indirecta	90
3.3.2.5.	Determinación del esfuerzo de adherencia	92
3.3.2.6.	Velocidad sónica	93
3.3.2.7.	Determinación del peso específico y absorción	94

3.3.3.	Resultados del test TCLP de las mezclas de hormigón con ceniza para el control ambiental	97
3.4.	Dimensionamiento de los equipos utilizados en el mecanismo de encapsulación de ceniza	100
3.4.1.	Ubicación geográfica de la planta piloto	101
3.4.2.	Balance de masa	102
3.4.3.	Diagramas del proceso	106
3.4.4.	Descripción del proceso	109
3.4.5.	Consideraciones para el dimensionamiento y selección de equipos	111
3.4.5.1.	Criba vibratoria	111
3.4.5.2.	Trituradora de mandíbula	111
3.4.5.3.	Mezcladora tipo turbina	114
3.4.5.4.	Banda transportadora	114
3.4.5.5.	Equipo vibrocompactador	116
3.4.6.	Metodología de control	117
3.4.7.	Distribución en planta	119
3.5.	Evaluación económica del proyecto	122
3.5.1.	Costo de inversión fija	123
3.5.2.	Costos de operación	124
3.5.3.	Beneficio ambiental	127
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
4.1.	Conclusiones	129
4.2.	Recomendaciones	131
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
	ANEXOS	146

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Subproductos obtenidos durante el proceso de pirólisis	1
Tabla 1.2.	Comparación de los procesos de pirólisis convencional alotérmicos y autotérmicos	4
Tabla 1.3.	Productos de la combustión incompleta del proceso de incineración	20
Tabla 1.4.	Ventajas y Desventajas de las técnicas de estabilización - solidificación	30
Tabla 1.5.	Clasificación de adoquines por su forma	36
Tabla 1.6.	Clasificación de adoquines por su uso	37
Tabla 1.7.	Descripción de normas para ensayos en fresco	39
Tabla 1.8.	Descripción de normas para ensayos en estado endurecido	40
Tabla 1.9.	Límites máximos permisibles en el extracto PECT (prueba de lixiviación) para metales pesados	41
Tabla 3.1.	Contenido mineralógico de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A	64
Tabla 3.2.	Resultado de concentración de metales pesados del extracto lixiviado de la ceniza en estado libre y comparación con la Ordenanza 404	66
Tabla 3.3.	Resultado de las propiedades físicas de la ceniza (densidad real, densidad aparente y porcentaje de vacíos)	69
Tabla 3.4.	Resultado del contenido de humedad presente en la ceniza	70
Tabla 3.5.	Propiedades físicas del agregado grueso, fino y del cemento	71
Tabla 3.6.	Dosificación de 1 m ³ de hormigón convencional f'c = 210 kg/cm ²	73
Tabla 3.7.	Dosificación de 1 m ³ de hormigón con varios porcentajes de ceniza	74
Tabla 3.8.	Relación en peso para cada una de las dosificaciones del hormigón con ceniza	75
Tabla 3.9.	Resultado de asentamiento para el hormigón convencional y hormigón con ceniza	76

Tabla 3.10.	Clasificación de la consistencia según los asentamientos medidos con el cono de Abrams	77
Tabla 3.11.	Resultado de la temperatura del hormigón convencional y hormigón con ceniza	78
Tabla 3.12.	Contenido de aire en hormigón convencional y hormigón con ceniza	79
Tabla 3.13.	Resultado del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón convencional y con ceniza a 3, 7, 14, 28 días de curado	81
Tabla 3.14.	Esquema de los modelos típicos de fractura para el hormigón convencional y con 15%, 20%, 25% y 30% de ceniza	83
Tabla 3.15.	Resultados del módulo de elasticidad del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado, comparación con norma ACI 318S-08	84
Tabla 3.16.	Resultados del módulo de rotura del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado; relación $MR/f'c$	88
Tabla 3.17.	Resultados de resistencia a la tracción indirecta del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado; relación $f't/f'c$	90
Tabla 3.18.	Resultados ensayo de adherencia del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado	92
Tabla 3.19.	Resultados de ensayo de velocidad sónica del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado comparados con bibliografía	93
Tabla 3.20.	Resultado de peso específico, absorción de agua y volumen de poros del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado	95
Tabla 3.21.	Comparación del extracto lixiviado de la ceniza libre respecto del hormigón con 10%, 15% y 20% de ceniza	97
Tabla 3.22.	Producción de ceniza de la planta de GPOWERGROUP S.A correspondiente a los años 2013 y 2014	101
Tabla 3.23.	Balance de masa por corrientes del proceso de elaboración de adoquines tipo C con dimensiones (200 x 100 x 80) mm, desde la entrada al proceso de tamizado hasta la salida del proceso de molienda	104
Tabla 3.24.	Balance de masa desde la entrada al proceso de mezclado hasta la entrada del proceso de vibrocompactación	105
Tabla 3.25.	Listado de equipos por etapas del proceso	110

Tabla 3.26.	Capacidad, dimensiones y características de la criba vibratoria seleccionada por catálogo	112
Tabla 3.27.	Capacidad, dimensiones y características de la trituradora de mandíbula seleccionada por catálogo	113
Tabla 3.28.	Capacidad, dimensiones y características de la mezcladora tipo turbina seleccionada por catálogo	115
Tabla 3.29.	Dimensiones y características de la banda transportadora seleccionada por catálogo	116
Tabla 3.30.	Capacidad, dimensiones y características del vibrocompactador seleccionado por catálogo	117
Tabla 3.31.	Detalle del sistema de control del mezclador MT-301	118
Tabla 3.32.	Descripción de la tubería de agua a ser utilizada	119
Tabla 3.33.	Detalle de áreas correspondientes al layout de la planta piloto para la elaboración de adoquines de hormigón con ceniza	119
Tabla 3.34.	Parámetros utilizados en la valoración económica del proyecto	122
Tabla 3.35.	Detalle de inversión fija en equipos, tubería y accesorios	123
Tabla 3.36.	Detalle total de los costos de inversión fija	124
Tabla 3.37.	Detalle de costos de materia prima y servicios industriales	125
Tabla 3.38.	Detalle de gastos en personal laboral	125
Tabla 3.39.	Detalle total de los costos de operación	126
Tabla AI.1.	Resultado del análisis granulométrico de ceniza de incineración de desechos sólido	147
Tabla AI.2.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis en el ensayo de humedad	149
Tabla AI.3.	Requerimientos químicos para cenizas volantes y puzolanas naturales bajo norma ASTM C618	150
Tabla AII.1.	Asentamiento recomendado para varios tipos de construcción	151
Tabla AII.2.	Tamaños máximos de agregados recomendados para varios tipos de construcción	151

Tabla AII.3.	Cantidades aproximadas de agua de mezclado a partir de asentamientos y tamaños máximos de agregados seleccionados	152
Tabla AII.4.	Relaciones agua-cemento máximas permisibles para la elaboración de adoquines	153
Tabla AII.5.	Relación agua-cemento basada en la resistencia a la compresión seleccionada	154
Tabla AII.6.	Volumen aparente de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón a partir del tamaño de partícula del agregado seleccionado y módulo de finura del agregado fino calculado	155
Tabla AIV.1.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de densidad y absorción de agua del agregado fino	162
Tabla AIV.2.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de masa unitaria del agregado fino	162
Tabla AIV.3.	Análisis granulométrico del agregado fino	164
Tabla AIV.4.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de densidad y absorción de agua del agregado grueso	165
Tabla AIV.5.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de masa unitaria del agregado grueso	166
Tabla AIV.6.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis granulométrico del agregado grueso	167
Tabla AIV.7.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de la densidad del cemento	169
Tabla AIV.8.	Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de masa unitaria suelta y compactada del agregado grueso	170
Tabla AIV.9.	Variables de control para el diseño de la dosificación del hormigón convencional	170
Tabla AV.1.	Variables para el cálculo de la resistencia a la compresión del hormigón convencional a 28 días de curado	174
Tabla AV.2.	Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón convencional a 28 días de curado	175
Tabla AV.3.	Variables para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta del hormigón convencional a 28 días de curado	178
Tabla AV.4.	Variables para el cálculo del módulo de rotura del hormigón convencional a 28 días de curado	179

Tabla AV.5.	Variables para el cálculo de la adherencia del hormigón convencional a 28 días de curado	180
Tabla AV.6.	Variables para el cálculo del peso específico, porcentaje de porosidad y porcentaje de absorción de agua del hormigón convencional a 28 días de curado	182
Tabla AVI.1.	Resultados de valores promedio para el asentamiento del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado	184
Tabla AVI.2.	Resultados de valores promedio para la temperatura del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado	184
Tabla AVI.3.	Resultados de valores promedio para el contenido de aire del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado	185
Tabla AVI.4.	Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón convencional a diferentes días de curado	185
Tabla AVI.5.	Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 15 % de ceniza a diferentes días de curado	185
Tabla AVI.6.	Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 20 % de ceniza a diferentes días de curado	186
Tabla AVI.7.	Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 25 % de ceniza a diferentes días de curado	186
Tabla AVI.8.	Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 30 % de ceniza a diferentes días de curado	186
Tabla AVI.9.	Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón convencional a 28 días de curado	187
Tabla AVI.10.	Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón con 15 % de ceniza a 28 días de curado	188
Tabla AVI.11.	Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón con 20 % de ceniza a 28 días de curado	189
Tabla AVI.12.	Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón con 25% de ceniza a 28 días de curado	189

Tabla AVI.13.	Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón con 30 % de ceniza a 28 días de curado	190
Tabla AVI.14.	Resultados para el valor promedio del módulo de rotura del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado	191
Tabla AVI.15.	Resultados para el valor promedio del ensayo de tracción indirecta del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado	192
Tabla AVI.16.	Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón convencional a 28 días de curado	192
Tabla AVI.17.	Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 15 % a 28 días de curado	193
Tabla AVI.18.	Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 20 % a 28 días de curado	193
Tabla AVI.19.	Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 25 % a 28 días de curado	193
Tabla AVI.20.	Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 30 % a 28 días de curado	194
Tabla AVI.21.	Resultados de valores promedio para la velocidad sónica del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado	194
Tabla AVI.22.	Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón convencional a 28 días de curado	195
Tabla AVI.23.	Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 15 % de ceniza a 28 días de curado	195
Tabla AVI.24.	Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 20 % de ceniza a 28 días de curado	195
Tabla AV.25.	Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 25 % de ceniza a 28 días de curado	196
Tabla AV.26.	Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 30 % de ceniza a 28 días de curado	196

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Esquema de un sistema alotérmico	3
Figura 1.2.	Esquema de un sistema autotérmico	3
Figura 1.3.	Esquema de la parrilla de un horno de incineración	9
Figura 1.4.	Reacciones al interior del horno de parrillas	10
Figura 1.5.	Esquema de un horno rotatorio	12
Figura 1.6.	Esquema de principio de funcionamiento de un horno de lecho fluidizado	13
Figura 1.7.	Tipos de incinerador de lecho fluidizado	14
Figura 1.8.	Incremento de la tasa de transferencia de calor por convección en función de la velocidad	16
Figura 1.9.	Entrada de aire primario y secundario en un incinerador de parrillas	17
Figura 1.10.	Evolución de los gases sobre la parrilla de combustión	18
Figura 1.11.	Variación de la carga térmica introducida a un horno de incineración vs tiempo	19
Figura 1.12.	Bloques de material de vidrio después del enfriamiento y aspecto de una tarjeta de vitrocerámica	23
Figura 1.13.	Muestra de ceniza proveniente del proceso de incineración encapsulada en una matriz de hormigón	24
Figura 1.14.	Muestra de ceniza y escoria de plomo encapsulada con polímero inorgánico	26
Figura 1.15.	Muestra de ceniza proveniente del proceso de incineración de residuos peligrosos antes y después del proceso de estabilización en matriz de cemento	28
Figura 1.16.	Muestra de lodo de bentonita proveniente del proceso de perforación de pozos de petróleo estabilizados en una matriz de cal	29

Figura 1.17.	Resistencia a la compresión de diversos sistemas cementosos	33
Figura 1.18.	Algoritmo para el diseño de mezclas de hormigón por el método ACI 211.1	34
Figura 2.1.	Preparación de probetas cilíndricas y viguetas para ensayos del hormigón en estado endurecido	52
Figura 2.2.	Curado de especímenes (probetas cilíndricas y viguetas)	53
Figura 2.1.	Operaciones unitarias consideradas en el diseño de la planta piloto de tratamiento de cenizas provenientes del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP S.A	61
Figura 3.1.	Ceniza recolectada del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP S.A	63
Figura 3.2.	Curva granulométrica de la ceniza	68
Figura 3.3.	Curva granulométrica del agregado fino	72
Figura 3.4.	Curva granulométrica del agregado grueso	72
Figura 3.5.	Asentamiento de acuerdo al tipo de hormigón	76
Figura 3.6.	Curvas de endurecimiento para el hormigón convencional (hc) y el hormigón con ceniza (15 %, 20%, 25% y 30%)	82
Figura 3.7.	Representación de una falla por compresión excéntrica	83
Figura 3.8.	Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 30 % de ceniza	85
Figura 3.9.	Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 25 % de ceniza	86
Figura 3.10.	Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 20 % de ceniza	86
Figura 3.11.	Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 15 % de ceniza	87
Figura 3.12.	Efecto de la ceniza en la resistencia a la flexión	89
Figura 3.13.	Superficie del hormigón después del ensayo de resistencia a la flexión	89
Figura 3.14.	Tipos de fisuras anómalas observado en el ensayo de tracción indirecta	91

Figura 3.15.	Influencia del porcentaje de ceniza en el peso específico	96
Figura 3.16.	Influencia de porcentaje de ceniza en la absorción de agua y volumen de huecos	96
Figura 3.17.	Porcentaje de encapsulamiento de los metales bario y níquel después del proceso de encapsulación	99
Figura 3.18.	Imagen satelital del Centro de tratamiento integral de la empresa GPOWERGROUP S.A y el área destinada a la planta piloto para la fabricación de adoquines	102
Figura 3.19.	Diagrama de bloques de la entrada del agregado grueso al proceso de tamizado y molienda para su clasificación y reducción de tamaño	104
Figura 3.20.	Diagrama de bloques del proceso de mezclado para obtención de hormigón con 15% de ceniza	106
Figura 3.21.	Diagrama de flujo (BFD) de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con cenizas	107
Figura 3.22.	Diagrama PFD de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con cenizas	108
Figura 3.23.	Diagrama PI&D de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con ceniza	120
Figura 3.24.	Layout de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con cenizas	121
Figura AIII.1.	Ensayo de asentamiento del hormigón convencional y con ceniza utilizando el cono de Abrams	156
Figura AIII.2.	Ensayo contenido de aire del hormigón convencional y con ceniza	156
Figura AIII.3.	Ensayo de resistencia a la compresión aplicado a una probeta cilíndrica de hormigón convencional y con ceniza	157
Figura AIII.4.	Ensayo de módulo de elasticidad del hormigón convencional y con ceniza	157
Figura AIII.5.	Ensayo de tracción indirecta del hormigón convencional y con ceniza	158
Figura AIII.6.	Ensayo de resistencia a la flexión del hormigón convencional y con ceniza, utilizando una viga simple con carga en los tercios	158

Figura AIII.7.	Ensayo de adherencia del hormigón convencional y con ceniza	159
Figura AIII.8.	Ensayo de velocidad sónica del hormigón convencional y con ceniza	159
Figura AIII.9.	Ensayo de peso específico y absorción de agua del hormigón convencional y con ceniza: a) masa de la probeta después del secado, b) masa de la probeta después del secado y de la inmersión, c) masa de la probeta después de la ebullición, d) masa de la probeta suspendida en agua	160
Figura AIV.1.	Frasco Le Chatelier utilizado en la determinación de la densidad del cemento	168
Figura AV.1.	Curva deformación vs carga hormigón convencional a 28 días de curado	177

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Resumen de los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades físicas de la ceniza	147
ANEXO II Resumen de datos bibliográficos utilizados para el diseño de la mezcla de hormigón por el método ACI 211.1: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweigh, and mass concrete	147
ANEXO III Fotografías de los ensayos realizados en estado fresco y endurecido del hormigón convencional y con ceniza	156
ANEXO IV Resumen del cálculo de la dosificación para elaborar 1 m ³ de hormigón convencional y con ceniza	161
ANEXO V Resumen del cálculo de las propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido	174
ANEXO V Resumen de resultados de valores promedio de las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón convencional y con ceniza	184

RESUMEN

El objetivo principal del presente proyecto fue diseñar una planta para la fabricación de mampuestos de hormigón de uso peatonal con la incorporación de ceniza proveniente del proceso de incineración en bruto de residuos industriales en la planta de GPOWERGROUP S.A, mediante el mecanismo de encapsulación.

Se partió de la caracterización física y química de la ceniza con el fin de obtener las propiedades en estado libre de la misma, donde se evidenció que el tamaño de partícula de la ceniza es 1,52 mm y cumple con los requerimiento del material fino utilizado en la elaboración de hormigón, menor a 5 mm. Mediante el test TCLP se demostró que la concentración de metales pesados lixiviados en la ceniza, inicialmente se encontraba por debajo de los límites permisibles establecidos en la Norma Técnica Residuos Peligrosos, Resolución No. 002-SA-2014 en correspondencia con el Registro oficial OM 404: Ordenanza Metropolitana de Quito N° 0404, Reformatoria de la Ordenanza Metropolitana N° 213, sustitutiva del Título V “del Medio Ambiente” del Libro Segundo del Código Municipal.

Sin embargo, existió una concentración de bario en la ceniza (11,0 mg/L) que comparada con el resto de metales pesados cuyo nivel es inferior al límite máximo permisible, esta concentración de bario fue superior. Dentro de la caracterización química de la ceniza, también se comprobó que ésta es de tipo C de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C618, con un 58,1 % de la composición total de los siguientes compuestos: óxido de silicio, óxido de hierro y óxido de aluminio.

Para determinar el porcentaje óptimo de sustitución de la ceniza como agregado fino en el hormigón, se elaboró una mezcla patrón de hormigón convencional de baja resistencia 210 kg/cm² y partir de esta se reprodujeron las mezclas de hormigón con varios porcentajes en peso de ceniza (30 %, 25 %, 20 % y 15 %); y una mezcla de hormigón adicional con incorporación de 10% de ceniza para llevar a cabo la evaluación de la lixiviación de los metales pesados en el residuo encapsulado.

Se evaluó la eficacia del proceso de estabilización por medio de la ejecución de ensayos físicos para la determinación de las propiedades mecánicas en estado fresco: temperatura, contenido de aire y asentamiento; y en estado endurecido: resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, tracción indirecta, densidad y absorción, velocidad sónica y adherencia de cada una de las mezclas de hormigón con ceniza comparándolas con las propiedades del hormigón convencional.

Además, se evaluó la acción estabilizante de los metales pesados atrapados en la matriz de hormigón mediante el Método EPA 1311: Toxicity Characteristic Leaching (TCLP) y su cumplimiento con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Técnica Residuos peligrosos, de la Ordenanza Metropolitana de Quito N° 0404.

Mediante la evaluación del comportamiento físico-mecánico, se determinó técnicamente que la mezcla de hormigón con el uso de 15 % de ceniza es la más adecuada; y se consideró como base para el diseño de la planta piloto de tratamiento de la ceniza generada en el proceso de incineración en bruto de residuos industriales de la planta GPOWERGROUP S.A.

Se diseñó la planta piloto para la fabricación de 900 unidades diarias de adoquines de uso peatonal tipo C, con las siguientes medidas: 200 mm de largo, 100 mm de ancho y 80 mm de espesor; tomando en cuenta las operaciones unitarias de tamizado, molienda, mezclado y vibrocompactación. En el diseño se realizaron los respectivos diagramas de flujo (BFD), PFD, PI&D y *Layout*.

De igual manera se realizó el dimensionamiento y selección así como la implementación en planta de una criba vibratoria con tamaño de alimentación menor a 40 mm; una trituradora de mandíbula con capacidad con tamaño de alimentación menor a 125 mm y tamaño de descarga de 0-30 mm; una mezcladora tipo turbina con eje vertical cuya capacidad nominal es de 0,35 m³ con descarga inferior; una banda transportadora de 6 m de longitud con velocidad

entre 0,5-4,0 m/s y un vibrocompactador cuya capacidad es de 10 adoquines/ciclo, 90 ciclos/h permitiendo la elaboración de 900 adoquines por día.

Para la evaluación económica del proyecto se determinó el valor total de la inversión fija para la implementación de la planta piloto junto con el valor total de los costos de operación; y se comparó con el costo que representaría contratar un gestor calificado para la disposición final de la ceniza. Por último se enunciaron los beneficios adquiridos por la empresa GPOWERGROUP S.A.

INTRODUCCIÓN

La incineración es un procedimiento utilizado para la eliminación de desechos sólidos, líquidos o gaseosos, estos últimos no suelen formar parte de los que típicamente son tratados en una planta de este tipo. La destrucción térmica de los residuos tóxicos y peligrosos implica la exposición controlada de los mismos a elevadas temperaturas (normalmente a 900 °C o 1200 °C) y, generalmente, en un medio oxidante. Idealmente, los principales productos generados en la combustión de residuos orgánicos son el dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua, y cenizas inertes; sin embargo, en la mayor parte de los casos, se puede encontrar productos distintos a estos, en función de la composición química del residuo incinerado y de las condiciones de la combustión (Nirich, 2006, pp. 10-11).

En el Centro de Tratamiento Integral (CTI) de la empresa GPOWERGROUP S.A las actividades relevantes del proceso de disposición final de residuos sólidos son: transporte y recepción en CTI, clasificación y separación, traslado a cubículos de almacenamiento temporal y pre-tratamiento, preparación de biomasa, molienda y trituración, adecuación de biomasa, alimentación al sistema térmico, destrucción-incineración, sistema de enfriamiento y limpieza de gases.

Los desechos que se incineran son los siguientes: absorbentes orgánicos; madera, aserrín y similares; empaques de caucho de filtros; tintas, pinturas, lacas o barnices; cartón, papel y relacionados que se encuentren contaminados con hidrocarburos; contenedores plásticos y tapas de tubos; wipes, fibras y textiles; geosintéticos; esponja y poliuretano, espumas; lodos, arenas y arcillas contaminadas; equipos de protección personal; desechos sólidos domésticos; vegetación y residuales de aceite y lubricantes (Gpower, 2013, p. 278).

Para Ribeiro et al. (2008) dada su composición, los residuos sólidos contienen elementos que darán lugar a la formación inevitable de cenizas, de esta manera los compuestos metálicos pueden convertirse en óxidos o hidróxidos, que ayuden a la alcalinidad de las cenizas residuales. Los compuestos minerales existentes

presentan también transformaciones como ocurre con el carbonato de calcio (CaCO_3), que, a temperaturas cercanas a 1 000 °C, se descompone en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2). Por lo tanto, la volatilización y transformación de estos elementos en partículas determinan, junto a sus propiedades físico-químicas, la distribución de los mismos entre las diferentes fracciones de cenizas que se forman en un incinerador de residuos sólidos. Las cenizas generadas tienen contaminantes tóxicos en su composición como el Cd, Pb, Zn, los cuales presentan un potencial lixiviante importante y a la hora de gestionar estos residuos es necesario controlar y tratar el lixiviado que puede llegar a producirse al momento de la aplicación de estos residuos (pp. 112-116).

Entre las aplicaciones de las cenizas como subproducto se encuentra la elaboración de hormigones, la cual se puede utilizar de las siguientes maneras: a) incorporación directa en la mezcladora, b) adición inerte, es decir, como un elemento sustituto o en muchos casos suplementario de agregado fino si existe deficiencia en ellos y un tercer caso c) mezclado con el clinker en la preparación de cementos (Santaella y Salamanca, 2004, p. 29).

La ceniza recolectada en el proceso de incineración del Centro de Tratamiento Integral de la empresa GPOWERGROUP S.A pasa a ser un problema de generación de residuo y en la actualidad se las dispone en celdas de confinamiento. Mediante este proyecto se busca gestionar la cantidad de 170 kg/día este residuo dándole un valor agregado en la fabricación de mampuestos de uso peatonal para la comunidad y de la empresa. Implementado este proyecto, la empresa pretende lograr una nueva opción en lo concerniente a la gestión de desechos sólidos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. CENIZAS DE LA INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS Y SU APLICACIÓN

1.1.1. TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS: PROCESOS TÉRMICOS

1.1.1.1. Pirólisis

El proceso de pirólisis se basa en la descomposición térmica de la materia orgánica presente en diferentes sustancias en los residuos, en ausencia de oxígeno o que se lleva a cabo con un cantidad reducida del mismo, con el fin de producir una combustión parcial aportando calor al proceso mediante sistemas alotérmicos o autotérmicos (Castells y Velo, 2012, p. 478).

El producto resultante en el proceso de pirólisis de la mezcla de residuos sólidos indicado en la Tabla 1.1, depende de las condiciones del proceso como: la temperatura de operación, la velocidad del calentamiento y la composición de los desechos de alimentación.

Tabla 1.1. Subproductos obtenidos durante el proceso de pirólisis.

Fracción	Componente
Gaseosa	Hidrógeno
	Nitrógeno
	Metano
	Etano
	Hydrocarburos C ₄ -C ₇
	Amoníaco
	Monóxido y dióxido de carbono
Otros	
Líquida	Metanol
	Fenoles

Tabla 1.1. Subproductos obtenidos durante el proceso de pirólisis (continuación...)

Fracción	Componente
Líquida	Acetona
	Acetaldehído
	Etanol
	Aceites ligeros
	Otros
Sólida	Carbón
	Sales
	Metales
	Cenizas

(Secretaría de Desarrollo Social de México- SEDESOL, 2001, p. 103).

Sistemas alotérmicos

Sistemas en los cuales la transferencia de calor se da por conducción y radiación de las paredes, es decir, indirectamente como se muestra en la Figura 1.1. La energía proveniente es la combustión de los gases producidos en la pirólisis o del propio coque. Se lleva a cabo, en ausencia de aire a temperaturas de procesos convencionales, de 500 a 600 °C.

Los productos en este tipo de sistemas son: un residuo sólido y una fracción gaseosa, esta última puede arrastrar, dependiendo de la naturaleza de la biomasa a pirolizar, diferentes vapores condensables y no condensables (Castells y Veló, 2012, p. 480).

Sistemas autotérmico

Son procesos en los cuales se eleva el nivel térmico con energía que proviene de la combustión de una parte de la carga, es decir, de un calentamiento directo como se presenta en el esquema de la Figura 1.2. Las reacciones deben

producirse en un medio químicamente inactivo, o de preferencia, en atmósfera reductora para evitar la combustión de una parte del combustible. Se puede inyectar aire al proceso para obtener ciertas ventajas como se indican en la Tabla 1.2 (Castells y Veló, 2012, p. 481).

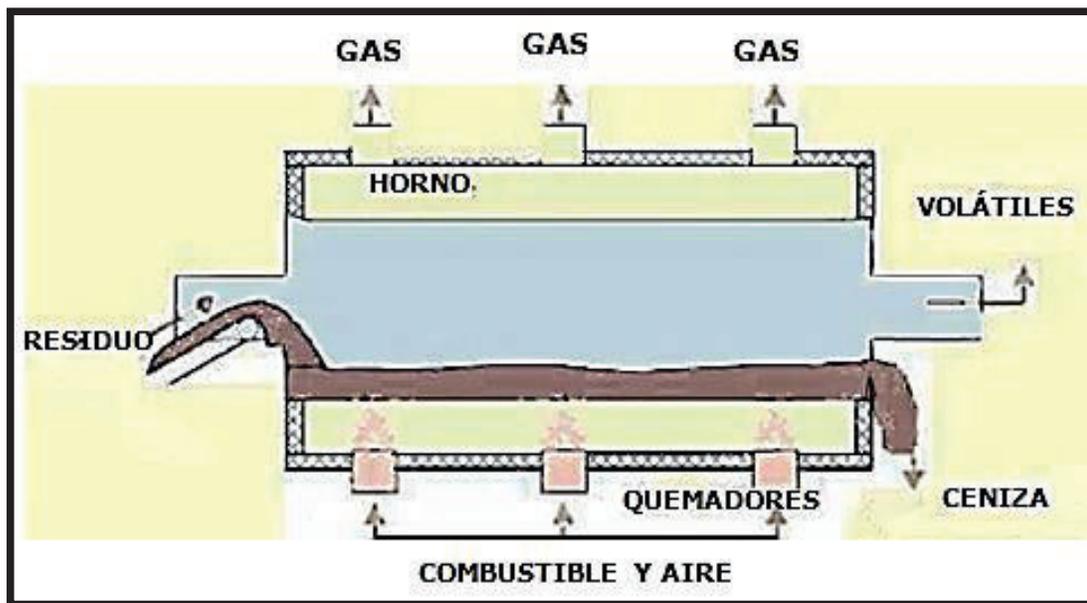


Figura 1.1. Esquema de un sistema alotérmico (Fernández, 2010)

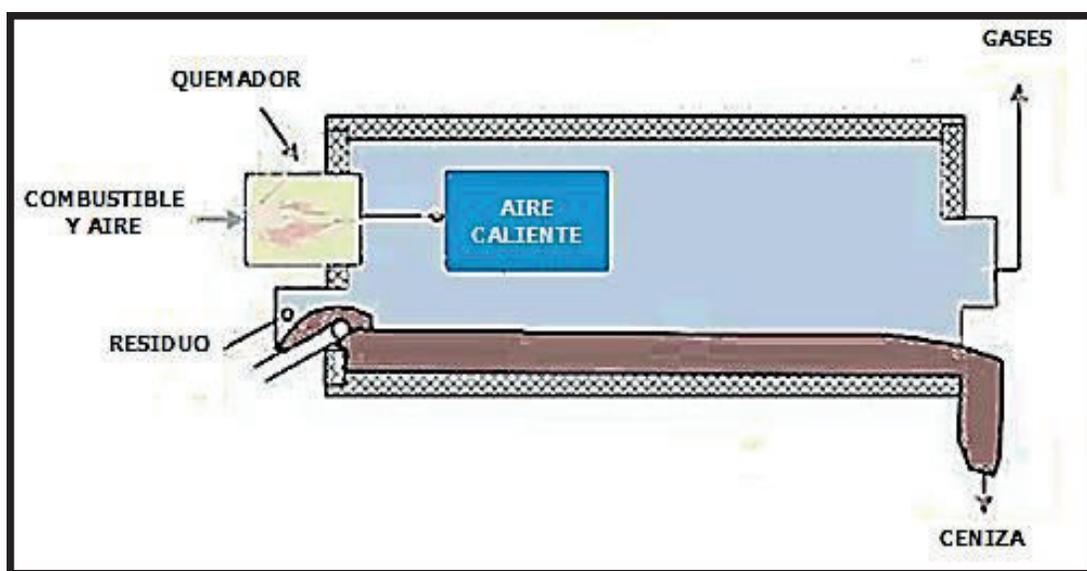


Figura 1.2. Esquema de un sistema autotérmico (Fernández, 2010)

Tabla 1.2. Comparación de los procesos de pirólisis convencional alotérmicos y autotérmicos

Calentamiento Directo	Calentamiento Indirecto
Transmisión de calor más eficiente	Se necesita intercambiadores de calor
La temperatura de pirólisis no es independiente de la de combustión	Se respeta la temperatura de pirólisis
El sistema de aislamiento soporta temperaturas hasta 1250 °C	Las paredes no se pueden aislar. La máxima temperatura de pared es de 750 °C
El material del reactor no presenta gran dilatación térmica	Se necesita de sistemas sofisticados para el reactor debido las grandes dilataciones

(Castells y Veló, 2012, p. 480)

Los procesos pirolíticos si se analizan desde el punto de vista operativo, donde las condiciones pueden variar, se pueden diferenciar tres tipos:

Pirólisis convencional

Este se trata de un proceso discontinuo, a presión atmosférica, con temperaturas entre 400 – 500 °C, una de las características del proceso es la velocidad de calentamiento que se ve reducida a una razón (<2 °C/s) y de esta manera prolongando su tiempo de reacción entre 5 minutos y de algunas horas; en lo referente a tiempos de residencia para gases y sólidos se habla de 5 segundos y de horas respectivamente. Por último, los productos mayoritarios que se obtienen del proceso son: coque y vapores condensables (Castells y Veló, 2012, p. 478).

Pirólisis rápida

A diferencia del caso anterior éste es un proceso continuo, con temperaturas más elevadas entre 400 – 800 °C y a vacío. Los tiempos de residencia de gases en el reactor son menores a 2 segundos evitando la condensación de volátiles, pero a temperatura moderada, esto es a 500 °C ya que existe presencia de condensables (Grau y Farré, 2011, p.26).

Pirólisis instantánea (flash)

También se trata de un proceso continuo con transmisión de calor muy rápida a temperaturas mayores de 600 °C y una velocidad de calentamiento superior de los 200 °C/s. Debido a estas características del proceso, se usa para pirolizar materiales con contenido alto en volátiles, donde los gases tienen un tiempo de residencia menor a los 0,5 segundos y en el cual se obtienen además gases e hidrocarburos ligeros (Grau y Farré, 2011, p.26).

1.1.1.2. Gasificación

Es un proceso de oxidación parcial en el cual se lleva a cabo la reacción de los productos orgánicos de una materia prima (sólida), en presencia de cantidades de oxígeno inferiores a las estequiométricamente requeridas y a elevadas temperaturas (mayores a 750 °C). El producto es un gas con poder calorífico de bajo a medio (Grau y Farré, 2011, p. 28).

La gasificación es una técnica eficaz en términos energéticos al momento de reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar energía. Principalmente el proceso involucra la combustión parcial de un residuo carbonoso para generar combustible en estado gaseoso con un alto contenido de: monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados, en especial el metano.

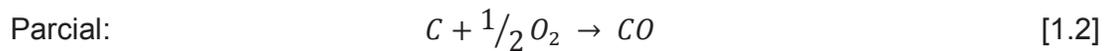
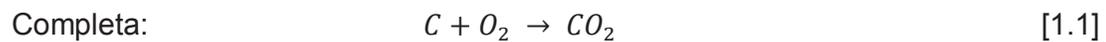
El combustible generado se lo puede utilizar para: motores de combustión interna, turbina de gas y calderas, cuando se necesita oxígeno adicional (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1998, pp. 708-709)

✓ Reacciones químicas en el proceso de gasificación

Cuando el material sólido entra en contacto con el gasificador se produce rápidamente el proceso de pirólisis, formando el coque representado en las reacciones 1.1 y 1.2. Es una etapa en la cual se da lugar a reacciones muy

complejas, de cuales, las reacciones sólido – gas 1.3, 1.4, junto con las reacciones 1.6 y 1.7 que forman hidrógeno (*shift*) y metano (metanización) respectivamente a partir del monóxido de carbono son las limitantes del proceso (Castells y Velo, 2012, p. 423).

Combustión (reacciones exotérmicas)



Gasificación



***Shift* (exotérmica)**



Metanización (exotérmica)



✓ Principios termoquímicos de la gasificación

El producto obtenido en el proceso es:

- Gas de síntesis: que se compone principalmente por monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno (si se empleara aire como oxidante) y metano en cantidades minoritarias. En pequeñas cantidades se encuentra hidrocarburos, como el etano y el etileno.

- Residuo sólido: en los cuales se encuentra materiales no combustibles y sin ningún contenido orgánico en el residuo a gasificar con características similares al que se obtiene del proceso de incineración, se habla de cenizas, alquitranes y aceites .

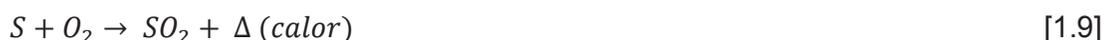
La composición del gas de síntesis depende mucho de las condiciones de operación en las que se realiza la gasificación, como de la composición del sólido a gasificar y el agente oxidante; son los parámetros que determinarán el poder calorífico del gas. (Greenpeace Argentina, 2010, p. 6).

De esta manera si se usa aire en el proceso de gasificación, el resultado es un gas con un poder calorífico superior, entre 4 – 7 MJ/Nm³, el cual se lo puede emplear como combustible para un generador de vapor, en un motor de combustión interna o en una turbina. El uso de oxígeno como agente oxidante produce un gas con un poder calorífico superior, entre 10 – 18 MJ/Nm³, que se puede considerar de mejor calidad, el cual se podría utilizar en la síntesis de varios compuestos como metanol (Castells y Velo, 2012, p. 420).

1.1.1.3. Incineración

Proceso de combustión controlada en el cual se someten a los residuos sólidos y líquidos, residuales o no, a temperaturas medias entre 850 – 1200 °C, por medio del desarrollo de reacciones de oxidación exotérmicas de los propios residuos. Los residuos necesitan contener, por lo menos, cualquiera de estos tres elementos: carbono, hidrógeno y/o azufre para combinarse con el oxígeno y producir calor (Castells, 2005, p. 72-73).

Las reacciones básicas de combustión de estos tres elementos son las descritas en las ecuaciones 1.8, 1.9 y 1.10:





Debido al calor liberado en la combustión se producen las siguientes etapas:

- Evaporación de agua residual
- Vaporización de compuestos volátiles
- Gasificación del contenido orgánico en el residuo
- Pirólisis de cierta fracción de materia orgánica
- Combustión total o parcial de otra fracción de la materia orgánica

Dentro del proceso, para que toda la fracción orgánica pase a la forma gaseosa será necesario enriquecer el aire del horno con oxígeno 3 – 5 %, los compuestos oxidables a esas temperaturas se habrán combinado con el oxígeno y toda la fracción inorgánica se reduzca a escorias (vidrio, piedras, metales) y cenizas. La intensidad de las etapas antes mencionadas, independientemente de las características del residuo puede verse afectada en mayor o menor grado debido a los siguientes factores (Castells, 2001, pp. 7-10; CESPV, 2004, p. 4):

Tipo de horno

✓ Horno de Parrilla

En la actualidad es el más conocido y desarrollado, esto por su gran empleo en el tratamiento de residuos sólidos, su manejo y su capacidad. La forma de su estructura es variable y ayuda a que el residuo que ingresa lo haga por gravedad por medio del movimiento de la parrilla y su inclinación, facilitando la aceleración de la combustión; a su vez deben cumplir con los requerimientos de entrada de aire primario, velocidad de transporte y mezcla de los residuos. El residuo no necesita que pase por un tratamiento previo de trituración favoreciendo a la transmisión de calor por radiación (Grau y Farré, 2011, p. 24).

Tanto la carga como el aire a la entrada son parte fundamental al inicio del proceso de incineración, los residuos que ingresan al horno pasan por una fase de secado debido a su contenido de humedad. Después se produce una etapa de pirólisis y gasificación, producto del ingreso del aire primario el cual se da por la parte inferior de la parrilla, no es suficiente para provocar la combustión de la fracción orgánica en el residuo como se indica en la Figura 1.3.

De igual manera este tipo de horno debe ser capaz de retener el residuo en la parrilla para que no caiga al contenedor de las cenizas hasta que se quemé como se muestra en la Figura 1.3.

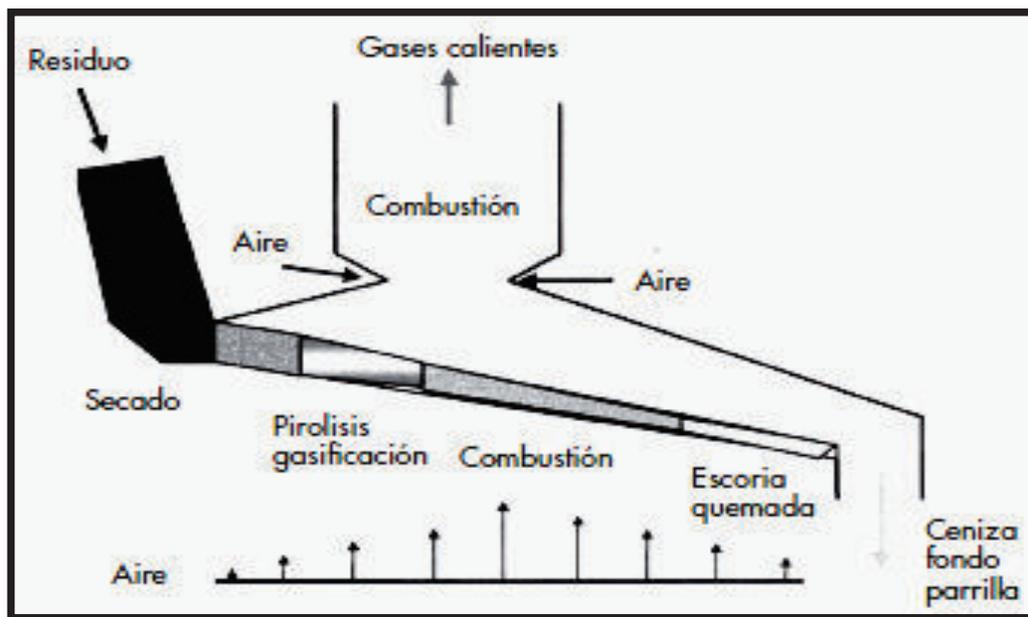


Figura 1.3. Esquema de un horno incinerador de parrillas (Castells, 2005)

En la Figura 1.4 se aprecian las reacciones que se dan en el interior de la parrilla además de lo que ocurre en cada zona.

Una de las reacciones principales es la formación de dióxido de carbono, proveniente de la combustión de la materia orgánica que se promueve en la superficie ayudada por el aire secundario. La oxidación de los residuos sólidos en

el sistema de parrilla se da por el aire primario que ingresa por la parte inferior de esta según la reacción 1.8.

En la zona de reducción el dióxido de carbono pasa a monóxido según la reacción 1.11:



Al mismo tiempo el calor que se genera por la combustión empieza a transformar el sólido en vapores volátiles, y de esta manera junto con el destilado recorren la zona de incineración, que al estar en contacto con el aire secundario se oxida a CO_2 según la reacción 1.12 (Castells, 2005, p. 289):

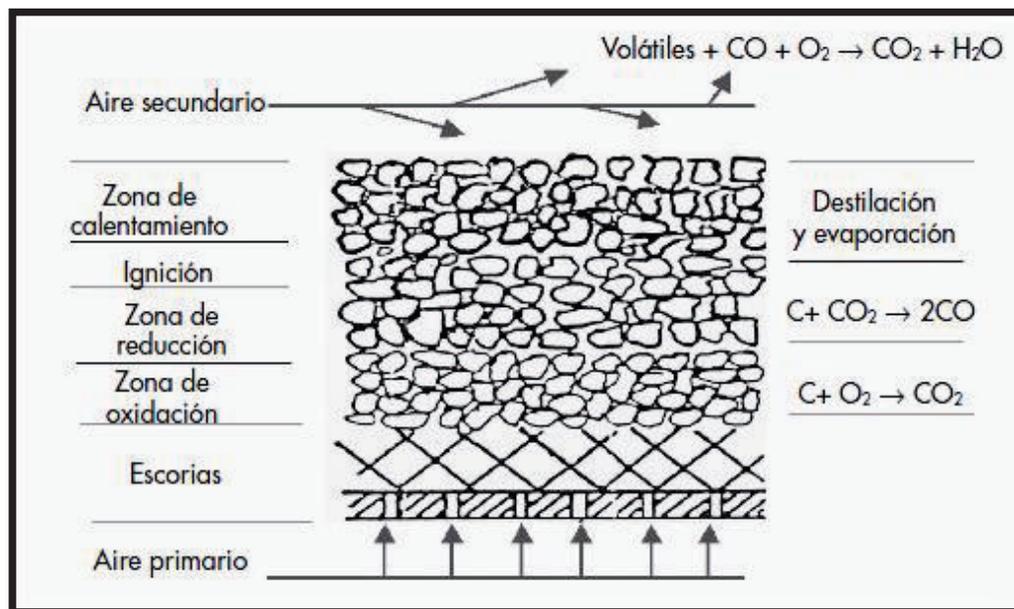


Figura 1.4. Reacciones al interior del horno de parrilla (Castells, 2005)

✓ Horno rotatorio

Este tipo de horno está formado de cámaras cilíndricas ligeramente inclinadas de 1° a 2° desde el extremo de la alimentación hasta el extremo del vertido de

cenizas, de forma que el residuo se mueve horizontal y radialmente a través del cilindro, sobre un sistema de rodadura que a su vez permite que el cilindro rote a velocidades suaves y variables (0,5 a 2,0 rpm) sobre su eje longitudinal (LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 859).

Su interior se encuentra revestido de material aislante en la primera capa y la interna, que se encuentra en contacto con la alimentación es de material cerámico refractario (CORANTIOQUIA, 2011, p. 5).

El tiempo de retención de los residuos es aproximadamente una hora, pero, esto depende de la inclinación, la velocidad de rotación y el largo de su cámara; que son ventajas de este horno al variarlas, y de esta manera se pueden obtener escorias de buena calidad (CORANTIOQUIA, 2011, p. 5).

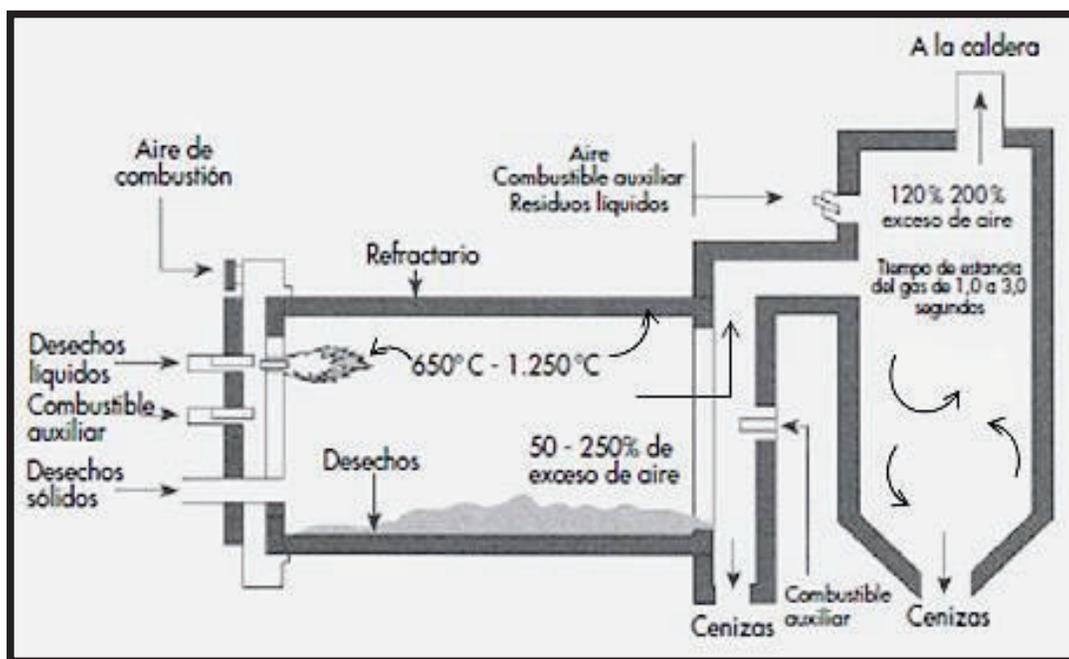


Figura 1.5. Esquema de un horno rotatorio (Castell y Veló, 2012).

Debido a que en el proceso se produce la volatilización y combustión parcial de los componentes del residuo por gasificación, es necesario contar con una segunda cámara de postcombustión, la cual cuenta con quemadores que usan

combustibles auxiliares o líquidos de alto poder calorífico para elevar y mantener la temperatura del proceso durante el tiempo que sea necesario como se muestra en la Figura 1.5.

Las temperaturas del proceso tanto para la primera como para la cámara de postcombustión están entre 650 – 1250 °C y 850 – 1600 °C respectivamente, como se indica en la Figura 1.5 (Martínez, 2005, pp. 113-114).

✓ **Horno de lecho fluidizado**

La incineración con lecho fluidizado es una variante a los sistemas comunes de incineración y la empresa GPOWERGROUP S.A., mantiene en sus instalaciones este tipo de horno para la quema de varios residuos sólidos generados principalmente de la industria petrolera, además de residuos sólidos urbanos generados de la zona.

En su forma más sencilla este tipo de horno consiste en una cámara vertical y cilíndrica en cuyo inferior contiene el material de lecho (arena, alúmina o carbonato de calcio), material inerte y esférico el cual debe poseer la capacidad de fluidizarse con el aire del proceso. La estructura está revestida de material refractario (CORANTOQUIA, 2011, p. 4).

El principio de funcionamiento de este horno se basa en la alta transferencia de calor que se produce desde las partículas del material refractario que forman el lecho, las mismas que se mantiene en constante agitación con el flujo de fluidización. Todo esto permite un buen mezclado y que los gases formados deban pasar a una segunda cámara para terminar con su proceso de incineración introduciendo aire secundario, como se indica en la Figura 1.6 (Castells, 2005, p.343).

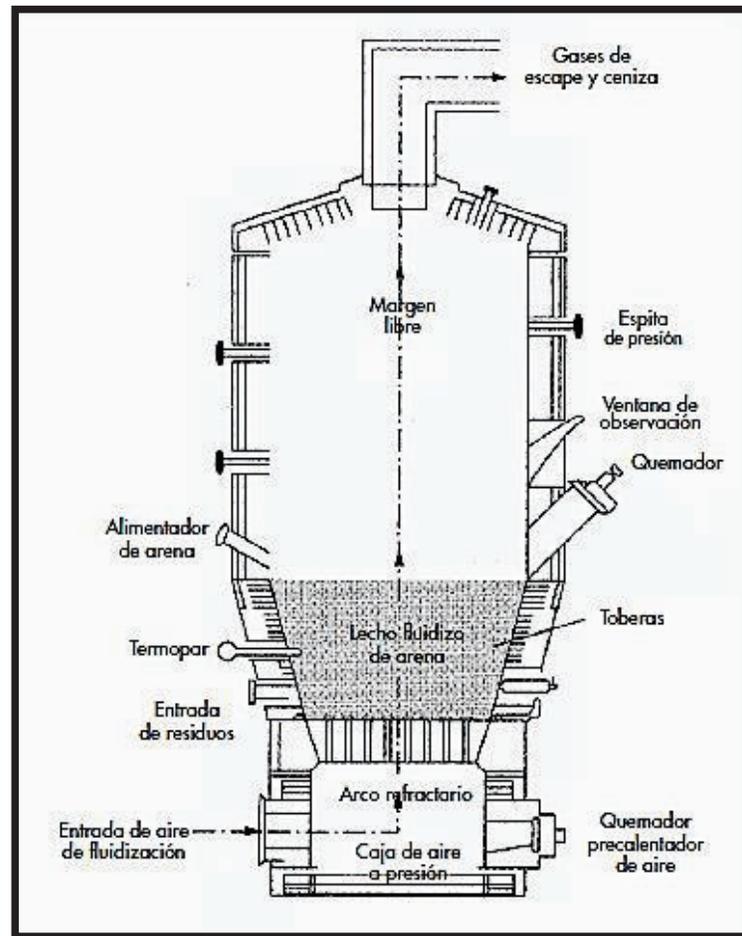


Figura 1.6. Esquema de principio de funcionamiento de un horno de lecho fluidizado (Castell y Veló, 2012).

Dependiendo del movimiento del lecho, se puede diferenciar en:

- Lecho fluidizado burbujeante (BFB): aquí se hace circular aire por la parte inferior del horno hasta hacer burbujear el lecho y provocar su suspensión. El producto del residuo es alrededor del 3 % del total de los desechos. Las escorias se recogen por la parte inferior y las cenizas se desvían con los gases de combustión.
- Lecho fluidizado circulante (CFB): es un proceso mejorado en comparación del anterior, en el que se obtiene una combustión completa y se puede controlar de mejor manera la temperatura. Debido a que el flujo de aire es

aumentado provoca que parte del lecho sea arrastrado con los gases de combustión.

- Lecho fluidizado “*Revolving type*”: el diseño de esta tecnología tiene como objetivo optimizar el contacto del lecho con las partículas manteniendo un movimiento continuo. Este tipo de lecho es de tipo BFB, en el cual se inyecta aire de manera no uniforme para crear zonas distadas de paso de aire. Adicionalmente se colocan deflectores en la parte inferior del lecho para provocar un movimiento circular de agitación al tener contacto con los sólidos de lecho (Grau y Farré, 2011, p.24).

Cada uno de los tipos de incineradores de lecho fluidizado se encuentran esquematizados en la Figura 1.7.

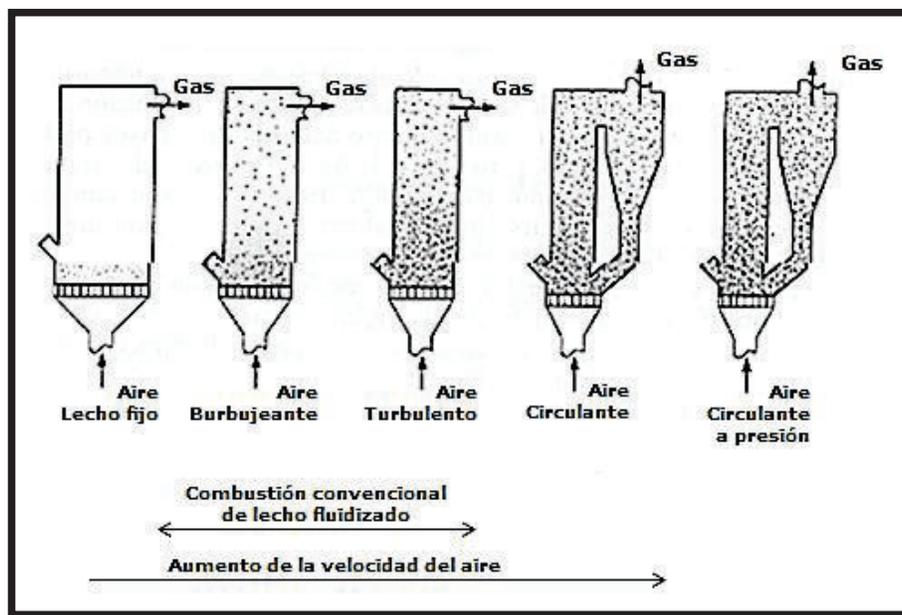


Figura 1.7. Tipos de incinerador de lecho fluidizado
(Adaptación de LaGrega, Buckingham y Evans, 1998)

El residuo se inyecta en el interior del lecho donde las temperaturas oscilan entre 850 – 950 °C en la zona superior del mismo, lo cual favorece a la retención de los gases producidos en la zona de combustión, dejando así, la parte interior del lecho a una temperatura comprendida entre 700 y 900 °C. (Castells, 2005, p.344; CORRANTOQUIA, 2011, p.7; Grau y Farré, 2011, p.24).

Forma de transferencia de calor hacia el residuo

El calor en el interior del horno el cual se encarga de apresurar la gasificación de la carga en una fracción de volátiles y otra fracción de gases, que al mantener contacto con el oxígeno desprenda el calor de combustión que genere la incineración, es procedente de las llamas, paredes y de la cámara radiante y se transmite por radiación mediante la Ecuación 1.13 (Castells, 2003, p. 10).

$$Q_R = A * h_i * (T_e^4 - T_p^4) \quad [1.13]$$

$$h_i = \sigma * \varepsilon * \frac{T_e^4 - T_p^4}{T_e - T_p} \quad [1.14]$$

Donde:

Q_R : calor por radiación (kcal/h)

h_i : coeficiente de transferencia de calor por radiación (kcal.m⁻²h⁻¹K⁻⁴)

σ : constante de Boltzmann = 4,9 x 10⁻⁸ (Kcal.m⁻²h⁻¹K⁻⁴)

ε : emisividad global relativa de la llama 0 < ε < 1

T_e : temperatura emisor (°K)

T_p : temperatura de pared (°K)

Además, se transmite calor al residuo por convección, ya que el aire primario que ingresa lo hace a cierta velocidad sobre todo en los hornos de parrilla. El calor total transferido hacia los residuos sería la sumatoria de estos dos, pero el calor por convección es poco más o menos despreciable como se puede observar en la Figura 1.8, donde los valores del coeficiente de convección para velocidades normales del fluido en el interior del horno 0,5 – 3,0 m/s no aparecen en la gráfica.

Una solución para mantener la transferencia de calor por convección (Q_c) es aumentar la velocidad del aire como se muestra en la Figura 1.8, parámetro que hará variar el coeficiente de transmisión por convección (h_c) como se muestra en la Ecuación 1.16 (Castells, 2003, p.10).

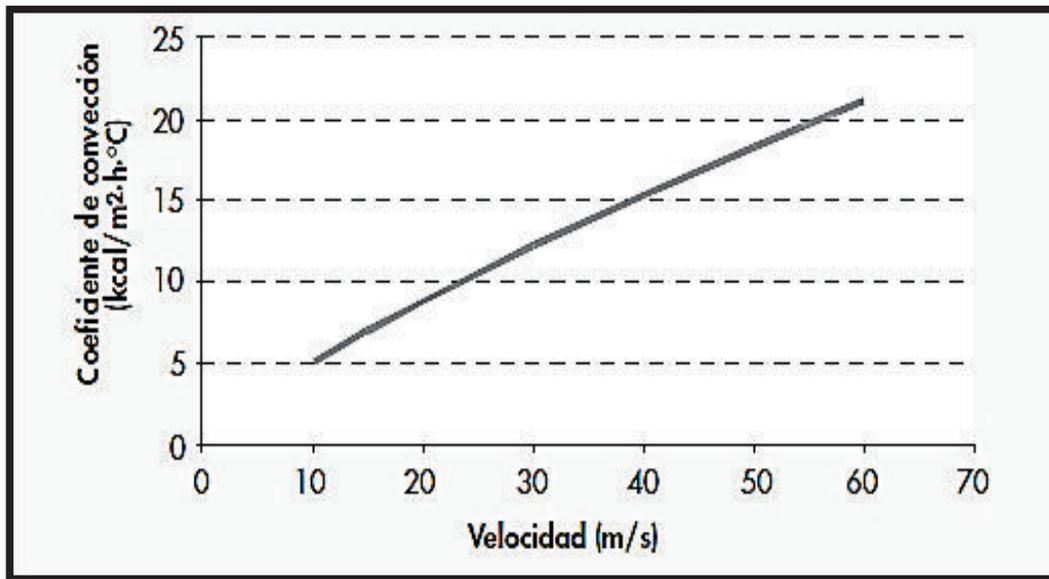


Figura 1.8. Incremento de la tasa de transferencia de calor por convección en función de la velocidad (Castells, 2005)

$$Q_c = A * h_c * \Delta T \quad [1.15]$$

$$h_c = 0,020 * \frac{d^{0,2} * K}{\nu^{0,3}} * V^{0,8} \quad [1.16]$$

Donde:

Q_c : calor por convección (kcal/h)

h_c : coeficiente de transmisión de calor por convección (kcal.m⁻²h⁻¹K⁻¹)

d : diámetro (m)

K : conductividad térmica de los gases (kcal.m⁻¹h⁻¹K⁻¹)

ν : viscosidad cinemática de los gases (m²h⁻¹)

V : velocidad de los gases (mh⁻¹)

Exceso de aire en el proceso

Para garantizar una combustión satisfactoria, el sistema de control del horno debe permitir el ajuste del mismo con el fin de obtener una relación recomendable entre los volúmenes de aire primario y secundario. Como referencia se toma al horno

de parrilla (Figura 1.9), en el cual el aire primario es inyectado por debajo de la parrilla mezclado con el residuo y su valor comprende entre un 60 % y 80 % del aire total. Mientras que, el aire secundario se inyecta a la entrada de la cámara de postcombustión para una posterior reacción con los gases de combustión formados, su porcentaje oscila entre el 20 % y 40 % del aire total (Castells, 2005, p.87).

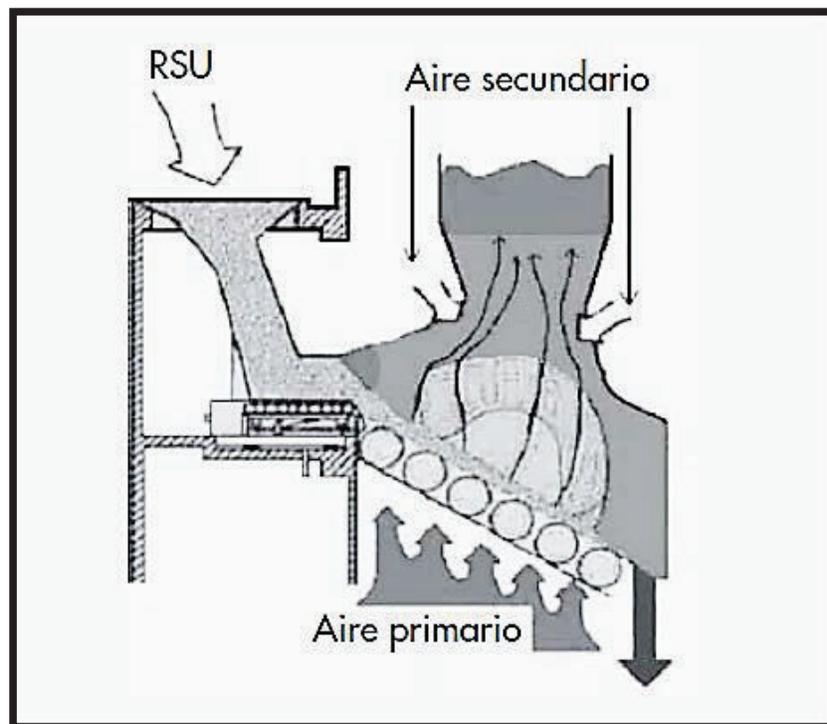


Figura 1.9. Entrada de aire primario y secundario en un incinerador de parrillas (Castells, 2005)

Si se tiene un lecho adecuado 10 – 15 cm, es importante que el oxígeno del aire no alcance la masa, por lo menos no en cantidades suficientes capaces de formar monóxido de carbono.

Sin embargo, un espesor superior del lecho se convertiría en un tipo de aislante a la transmisión de calor, que en esta etapa se da por radiación de la llama y de las paredes; e implica pérdidas de carga y falta de oxígeno. De esta manera se forma más monóxido de carbono, pero al introducir más aire se llega al equilibrio como se indica en la reacción 1.17.



Por lo tanto, se volverá a formar monóxido a expensas del dióxido de carbono, es decir, la inyección de aire primario tiene un límite como se observa en la Figura 1.10, y será necesario que esta sea lo suficiente para alcanzar el equilibrio de la reacción anterior. En consecuencia, así se llegue a formar un espesor mínimo de residuo adecuado sobre la parrilla, será conveniente inyectar aire secundario sobre los gases de combustión, y así se garantizará una buena presencia de oxígeno (Castells, 2005, p. 290-291).

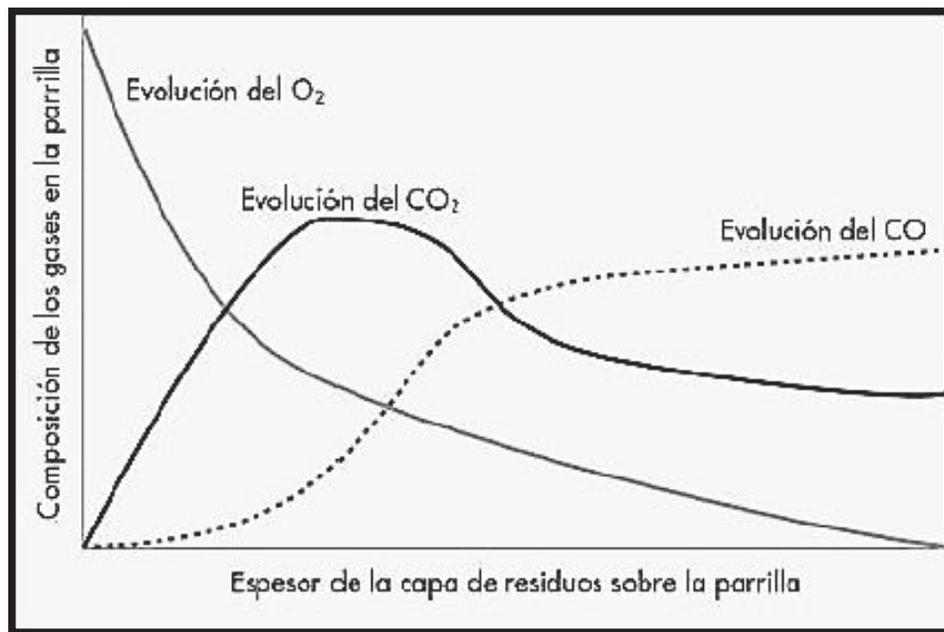


Figura 1.10. Evolución de los gases sobre la parrilla de combustión (Castells, 2005)

Factores relativos al tamaño del combustible y alimentación al horno

Al momento de alimentar la carga hacia el horno es necesario que el residuo presente varias etapas por tamaños para garantizar que la superficie específica sea la mayor posible. Los hornos de incineración se diseñan con la finalidad de que trabajen con cargas térmicas (kcal/h) en lo posible constantes y para esto es necesario poder cumplir con las siguientes condiciones:

- ✓ Que el poder calorífico del residuo que ingresa al horno sea constante, por lo que, es importante conocer la caracterización del residuo. Si no se puede conocer ésta, se debe proceder a diseñar una mezcla de diversos tipos de residuos con el fin de obtener una carga con un poder calorífico regular o uniforme.
- ✓ En la Figura 1.11, se observa la variación de la carga térmica en el horno de incineración (kcal/h) respecto al tiempo, si la alimentación se trata de residuos de poder calorífico discontinuo; o residuos de poder calorífico constante (Castells, 2003, p.18).

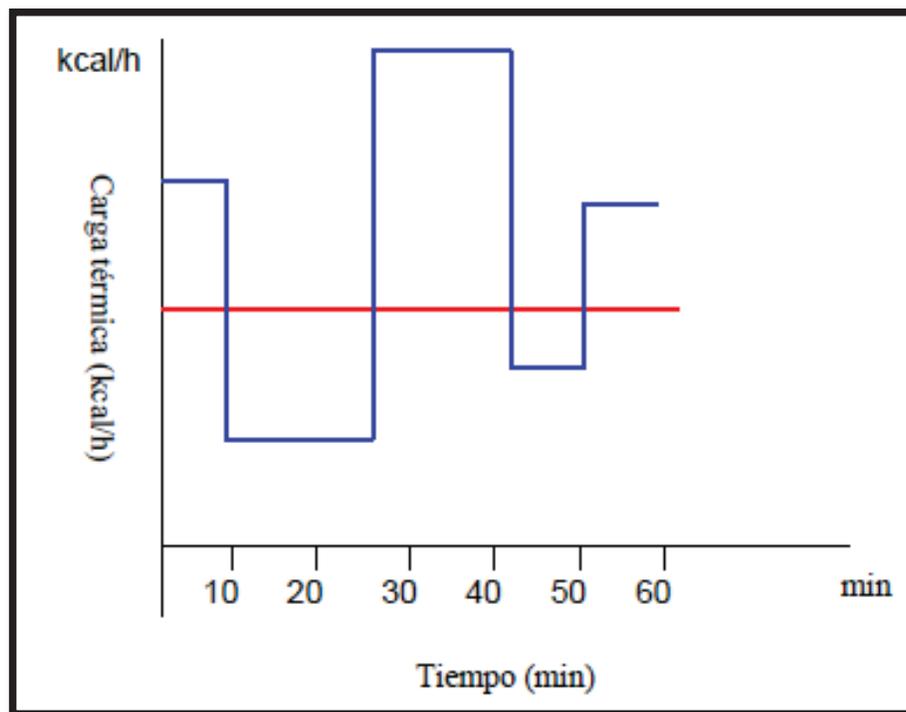


Figura 1.11. Variación de la carga térmica en un horno de incineración vs tiempo (Castells, 2003)

Factores relativos al residuo y su naturaleza

Los residuos en muchas ocasiones son mezclas complejas y durante el proceso de incineración se lleva a cabo la formación de compuestos que no son

identificados al momento de hacer la mezcla de alimentación. Estos compuestos derivados del proceso son llamados “productos de la combustión incompleta”, que resultan de las diferentes reacciones intermedias que se dan por los rangos de temperatura del proceso.

En la Tabla 1.3 se dan a conocer algunos de los productos más frecuentes que se pueden hallar en la incineración de residuos complejos (Castells, 2003, p. 8).

Los compuestos presentados en la Tabla 1.3 son productos de las etapas de gasificación, pirólisis y vaporización que se efectúan en el horno, las que no son capaces de asegurar su destrucción. De hecho, es fundamental tener una cámara de postcombustión para su destrucción y evitar que estos compuestos a su vez den paso a reacciones que formen compuestos clorados (Castells, 2003, p. 8).

Tabla 1.3. Productos de la combustión incompleta del proceso de incineración

Compuesto Volátil	Compuesto Semivolátil
Benceno	Fenil
Tolueno	Naftaleno
Clorobenceno	Butilbencilftalato
Cloruro de metileno	Dietilftalato
Tetracloruro de carbono	Bis (2-etilexil) ftalato
Cloroformo	
Tetracloroetileno	

(Castells, 2003, p. 17)

1.1.2. TRATAMIENTOS PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE LA CENIZA GENERADA EN EL PROCESO DE INCINERACIÓN Y SUS APLICACIONES

Los productos que resultan del proceso de incineración son gaseosos y sólidos, cada uno de ellos con niveles diferentes de peligrosidad. Los residuos sólidos generados pueden ser de dos tipos:

- *Cenizas volátiles*: formadas por inquemados, metales pesados adheridos a las partículas y sales procedentes de las etapas de neutralización de los gases ácidos (Casas, Torras, Garriga y Martell, 2005, p. 89).
- *Cenizas de fondo*: que dependiendo del tipo de parrillas u otro sistema de combustión que se utilicen tendrán mayor o menor cantidad de inquemados. Además contienen las fracciones mayoritarias de inertes (vidrio, metales, cerámica, etc.), de color gris a negro con la mayor parte del material parecido a arena (Castells, 2012, p. 380).

Debido a las diferentes características de este tipo de cenizas, las cuales se diferencian por la tecnología empleadas en la incineración de residuos en bruto es necesario buscar una alternativa para su disposición final la cual deberá estar aceptada dentro de la normativa ambiental vigente (CEDEX, 2008, p. 178) .

Existen diversos tipos de tratamiento sugeridos para la disposición final de cenizas procedentes de los procesos de destrucción térmicos desde una perspectiva ambiental favorable, dentro de los cuales se puede citar los siguientes:

1.1.2.1. Depósito en vertedero

Las cenizas producto del proceso de incineración de residuos sólidos debido a sus características tanto físicas como químicas representan un problema ambiental lo que hace imposible que se viertan directamente en celdas de seguridad sin el permiso de la autoridad competente.

En el país el Acuerdo Ministerial No. 028 que sustituye al Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundario, en su Sección II: Gestión Integral de Desechos Peligrosos y/o Especiales, Párrafo V de la eliminación y disposición final, art.128 dice: *“En el caso de desechos peligrosos, la disposición final se lo realiza en celdas o rellenos de seguridad que cuenten con la respectiva regulación ambiental. En el caso de desechos especiales se podrá realizar en*

sitios tales como el relleno sanitario, que cuente con la autorización ambiental respectiva, siempre y cuando lo disponga la Autoridad Ambiental Competente de acuerdo a la caracterización físico-química del desecho especial y demás criterios que ésta expida”.

Además el mismo artículo estipula que: *“El generador considerará la disposición final de desechos peligrosos y/o especiales, como la última alternativa para la gestión de los mismos, de acuerdo a los criterios de jerarquización de la gestión de desechos; por lo cual priorizará la prevención de la generación, el aprovechamiento, la valorización y deberá demostrar que no existen métodos de tratamiento dentro y fuera del país aplicables para el desecho en cuestión”.* Como conclusión, las cenizas antes de ser depositadas en vertederos deberán pasar por un pretratamiento (físico-químico) que conlleve a la estabilización, inertización o la inmovilización física de los componentes contaminantes.

1.1.2.2. Tratamientos físico-químicos

Los tratamientos físicos son aquellos que no modifican la composición del residuo, su objetivo principal es la separación de componentes y concentrar las sustancias peligrosas favoreciendo la manipulación de manera segura. Entre los principales tratamientos físicos se encuentran: desorción con aire o vapor, la adsorción por carbón, la sedimentación, la extracción por vapor del suelo (Loayza y Meza, 2009, p. 10).

Los tratamientos químicos provocan un cambio en la estructura química de los componentes peligrosos de los residuos, transformando las características de éstos en menos contaminantes, el cambio puede llegar a ser irreversible pero puede pasar que las características de peligrosidad se reproduzcan si se alteran las condiciones externas al proceso. Los principales tratamientos químicos a mencionar son: la neutralización química, oxidación química, procesos de membrana, la precipitación y la fotocatalisis (Loayza y Meza, 2009, p. 11).

1.1.2.3. Vitrificación

El vidrio es un producto inorgánico (70 % óxido de silicio, el resto óxido de calcio y óxido de sodio) fundido que se enfría hasta que pase a un estado rígido, de esta manera permite que se pueda incorporar compuestos altamente tóxicos como óxidos metálicos a su red cristalina. Cuando el residuo se encuentra en el seno del vidriado, éste es parte de la naturaleza vítrea formando un todo (silicatos).

Este tratamiento se considera como el más seguro para la disposición de cenizas que provienen del tratamiento térmico de los residuos sólidos, esto se debe a que admite:

- Materia orgánica
- Sales secundarias
- Reactivos en exceso
- Material particulado
- Compuestos orgánicos

Además es necesario añadir otros compuestos, principalmente cuarzo (formador de vidrio), esto debido a que la ceniza por sí sola no es vitrificable (Castells, 2009, p. 135).

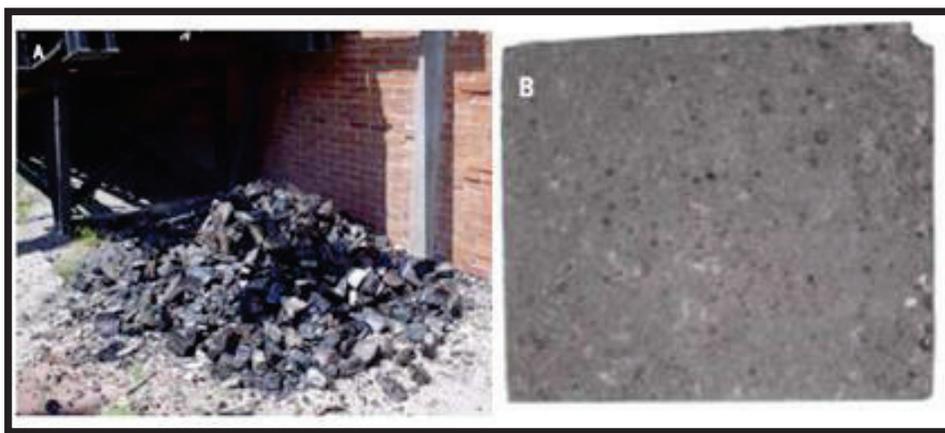


Figura 1.12. A) Bloques de material de vidrio después del enfriamiento, B) aspecto de una tarjeta de vitrocerámica (Ballesteros et al, 2010)

Los elementos resultantes son totalmente inertes y estables a lo largo del tiempo; esto último es resultado de investigar y comprobar el correcto funcionamiento de esta técnica al reducir la toxicidad de los residuos peligrosos. El producto final es un material aprovechable en forma de productos comerciales como se muestra en la Figura 1.12 (Ballesteros et al, 2010, p. 2).

1.1.2.4. Estabilización - Solidificación

Básicamente, la estabilización es un proceso que consiste en la mezcla de aditivos (polímeros, cal, cemento, puzolanas, etc.) con los residuos a tratar para minimizar la velocidad de migración de los contaminantes del mismo y reducir su toxicidad. Por otra parte, la solidificación es un proceso que consigue recubrir y encapsular el residuo en una matriz sólida para aumentar la resistencia y disminuir su compresibilidad y permeabilidad (LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 743; Pérez, 2014, p.17).

El principal objetivo de los tratamientos de estabilización-solidificación, es acondicionar de manera física, con la disminución del área superficial de los residuos sólidos y de esta manera llegar a reducir la transferencia de masa y la solubilidad de los contaminantes presentes. En tipo de tratamiento intervienen los siguientes mecanismos (DDSS y OCADE, 2007, pp. 108-109):

- Encapsulamiento
- Absorción
- Adsorción
- Intercambio iónico
- Precipitación
- Transformaciones químicas

El mecanismo más usado y en el cual se basa esta investigación es el encapsulamiento, para lograr la estabilización por este mecanismo intervienen los siguientes procesos:

- **Macroencapsulación:** es el mecanismo por el cual las sustancias peligrosas contenidas en el residuo quedan atrapados en una matriz estructural de mayor tamaño, es decir, que éstas quedan retenidas en los espacios de los poros del material estabilizante como se muestra en la Figura 1.13. Sin embargo, podría existir una aparición de los contaminantes por la degradación física del material estabilizado con el tiempo, debido a las condiciones medioambientales de: humectación y desecación o congelación y deshielo, penetración de fluidos de percolación y tensiones físicas de carga (LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 755; ACI, 2001, p. 3).



Figura 1.13. Muestra de ceniza proveniente del proceso de incineración encapsulada en una matriz de hormigón (Benavides, 2014)

- **Microencapsulación:** en este caso las sustancias peligrosas del residuo permanecen atrapadas en el interior de una matriz estructural de menor tamaño, quedando atrapado la mayor parte del residuo. De tal manera al no quedar el residuo fijado químicamente, la velocidad de migración de la masa estabilizada puede aumentar al disminuir el tamaño de partícula y estar expuesta a una superficie mayor (LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 751).

Las técnicas más utilizadas para llevar a cabo el proceso de encapsulación son las siguientes (DDSS y OCADE, 2007, pp. 108-109):

Técnica en base a polímeros termoplásticos

Para llevar a cabo la estabilización se combinan materiales termoplásticos fundidos (asfalto, parafina, betún, polietileno, propileno) con los residuos a altas temperaturas, cuando se utiliza betún (subproducto de la destilación del petróleo, mezcla de hidrocarburos con impurezas), la relación residuo/betún se encuentra comprendida entre 1:1 y 2:1. Una vez frío el material estabilizado es conservado en contenedores específicos para su respectiva disposición (Bañon y Beviá, 2000, p.147; LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 769).

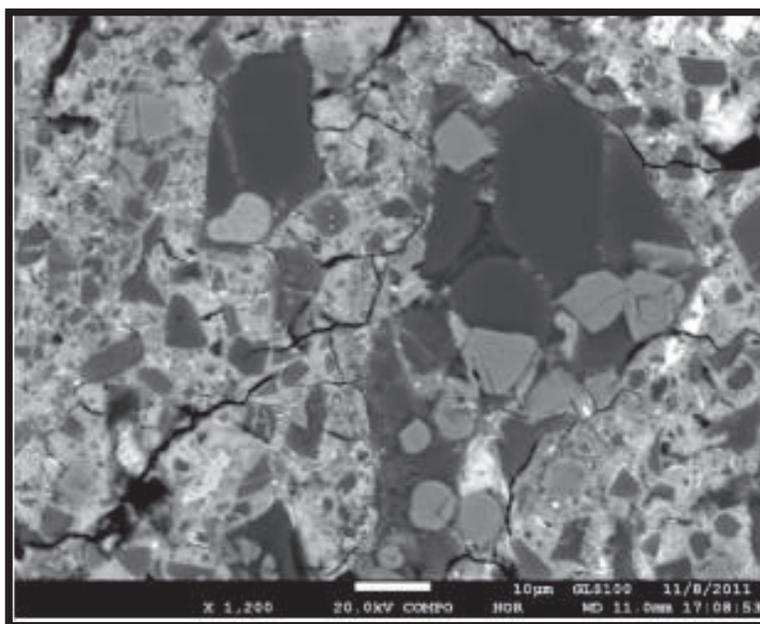


Figura 1.14. Muestra de ceniza y escoria de plomo encapsulada con polímero inorgánico (Onisei et al, 2012)

En la Figura 1.14 se observa la polimerización de ceniza y escoria de plomo con un polímero inorgánico, de la cual se obtiene un producto amorfo (Onisei et al, 2012, p. 7).

Técnica en base a polímeros termoestables

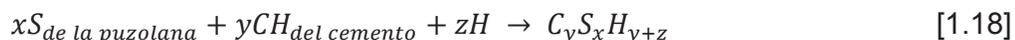
Esta técnica consiste en estabilizar el residuo peligroso por medio de polímeros orgánicos, comúnmente se lleva a cabo una mezcla de un monómero con úrea formaldehído que actúa como catalizador, para dar paso a la formación de un material polimérico. Básicamente se forma una masa tipo esponja la cual retiene las partículas sólidas del residuo peligroso. Sin embargo, esta técnica puede dejar libres algunos residuos, en especial los líquidos. El producto del residuo final, se seca y se conserva en contenedores antes de su disposición final (Kaifer, 2006, p. 34).

Técnica de fijación inorgánica

Dentro de esta técnica se promueven la utilización de varios materiales aglomerantes como:

- a) Puzolanas: es un material rico en sílice, que reacciona principalmente con la cal del cemento en presencia de agua para originar un material de cementación denominado hormigón puzolánico, la Ecuación 1.18 describe tal proceso y es llamada “reacción puzolánica”.

Adicionalmente, las puzolanas indican diferentes características dependiendo de su procedencia, es decir, naturales o derivadas de las diferentes actividades procesos industriales: sílice condensada, ceniza de cascarilla de arroz, cenizas de alto horno, cenizas volantes. Una de las características es su poder cementante con un alto grado de vitricidad, siendo las mejores las puzolanas amorfas (vitreas) (Kaifer, 2006, p. 33; Escalante, 2002, pp. 3-4; Hernández, 2010, p. 19).



Kuder et al. (2012), en su estudio afirma que la reacción puzolánica de los materiales de cementación es lenta (que disminuye el calor), que depende de la disponibilidad de hidróxido de calcio, incrementando su resistencia frente a los ambientes ácidos; y solo se puede dar después de que se inicia la hidratación del cemento rellorando los espacios de la pasta cementante, lo que aumenta la permeabilidad y la resistencia mecánica (p. 8).

Las propiedades de las puzolanas obedecen a la composición química y su estructura interna. Dentro de éstas prevalecen dos tipos, C y F, cuya composición química se caracteriza por la presencia de los tres principales óxidos: dióxido de sílice, óxido de aluminio, óxido de hierro (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) en cantidades mayores a 50 % y 70 % respectivamente (Hernández, 2010, p. 19).

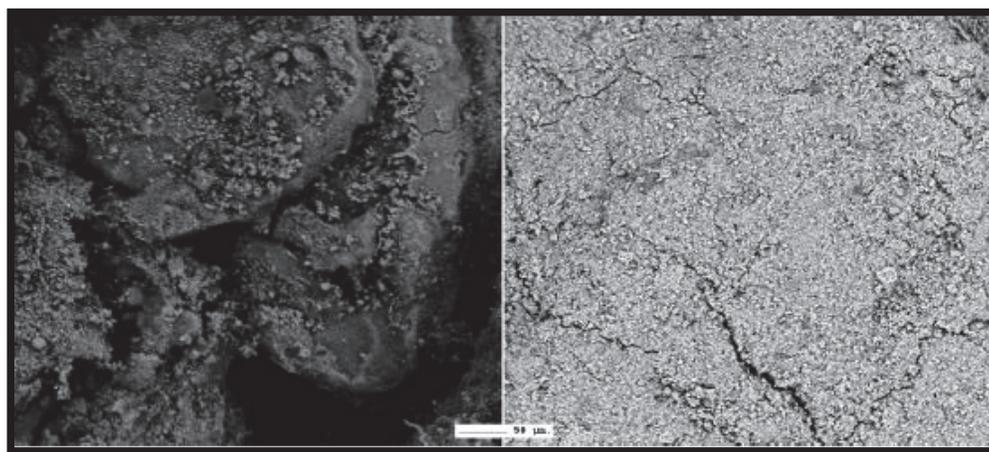


Figura 1.15. Muestra de ceniza proveniente del proceso de incineración de residuos peligrosos antes y después del proceso de estabilización en matriz de cemento (Anastasiadou, Christopoulos, Mousios y Gidaragos, 2012)

En la Figura 1.15 se evidencia una muestra de ceniza proveniente del proceso de incineración de residuos peligrosos estabilizada en una matriz de cemento observada por un microscopio electrónico de barrido; en la cual, es evidente la homogenización del residuo en la mezcla después del proceso de estabilización (Anastasiadou, Christopoulos, Mousios y Gidaragos, 2012, p. 3).

- b) Cal: muy utilizada para la estabilización de lodos y suelos, dando lugar a la reacción de los componentes presentes en el residuo junto con la cal, obteniendo así (silicato cálcico, alúmina cálcica o aluminato – silicato cálcico hidratados).

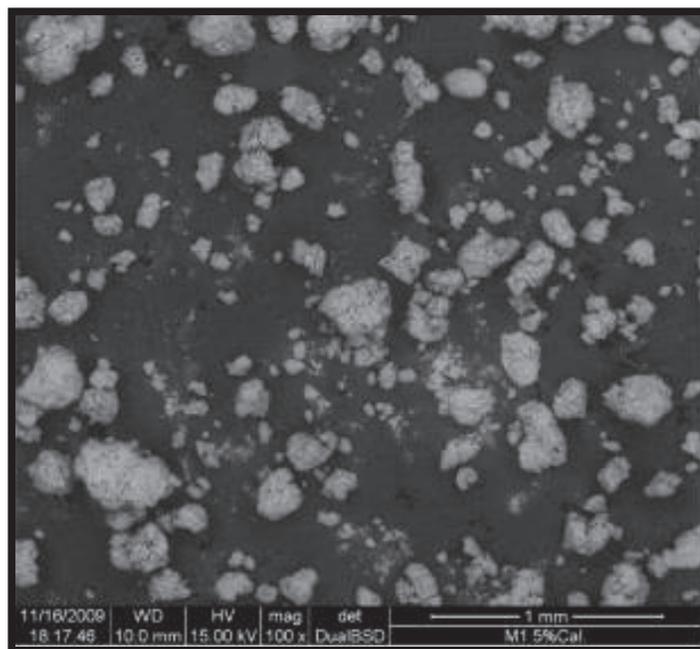


Figura 1.16. Muestra de lodo de bentonita proveniente del proceso de perforación de pozos de petróleo estabilizados en una matriz de cal (Castro et al, 2011)

El trabajo realizado por Castro et al. (2011) expone los resultados obtenidos a partir de tratamiento con cal de muestras de lodo de bentonita obtenidos de la máquina perforadora de pozos (Figura 1.16). El estudio se basa en ensayos de caracterización mineralógica, química, geotécnicos y mecánicas de la mezcla de lodos de bentonita con la proporción óptima de 3% de cal, logrando mejoras del 80% de las propiedades respecto de lodos sin cal (p.2).

- c) Cemento: se mezcla con el residuo y en muchos casos para obtener una mayor hidratación se añade agua obteniendo una estructura cristalina de aluminosilicato cálcico, masa dura, monolítica y de aspecto rocoso. Se adapta de mejor manera con residuos inorgánicos, principalmente los que

contienen metales pesados, debido a que los metales son retenidos como hidróxidos insolubles o carbonatos en la estructura endurecida producto del pH elevado del cemento.

Además, la cementación abarca la intervención de otros fenómenos que en forma conjunta acceden a la retención de los metales en el estrato sólido: la absorción de líquidos con metales en solución que disminuye la capacidad de campo del residuo a tratar, la fijación por reacción química de los metales con los productos de hidratación del hormigón, la adsorción de los metales por la formación de la fase sólida del hormigón. (Kaifer, 2006, p. 33-34; Lara y Melgoza, 2009, p. 2).

En la Tabla 1.4 se describen las principales ventajas y desventajas de cada una de las técnicas utilizadas en el proceso de encapsulación.

Tabla 1.4. Ventajas y desventajas de las técnicas de estabilización – solidificación

Técnica	Ventaja	Desventaja
Basados en polímeros termoestables	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Material que se obtiene es de baja densidad ✓ Se requiere de pequeñas cantidades de aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polímeros biodegradables ✓ Colocación en contenedores después del proceso
Basados en polímeros termoestables	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Material que se obtiene es de baja densidad ✓ Se requiere de pequeñas cantidades de aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polímeros biodegradables. ✓ Colocación en contenedores después del proceso
Basados en polímeros termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Resistencia a soluciones líquidas del producto final ✓ Adherencia entre el residuo y el material termoplástico es buena ✓ Pocos lixiviados 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mano de obra calificada ✓ Equipamiento costoso ✓ Inflamabilidad de los materiales termoplásticos

(Pérez, 2014, p.19)

1.1.3. APLICACIONES DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE PROCESOS TÉRMICOS

En Ribeiro et al. (2008) se mencionan algunas aplicaciones que se pueden dar a las cenizas provenientes de los procesos térmicos de residuos sólidos, las cuales están relacionadas con materiales de construcción (p. 120).

1.1.3.1. Valoración en cementera

Las materias primas que se usan en la fabricación del clinker para el cemento son: la caliza, la arcilla y ligeras cantidades de correctores de formulación. El clinker mineralógicamente está formado por silicatos y aluminatos con fórmulas complejas, entre las cuales están:

- Silicato tricálcico: $\text{SiO}_2 \cdot (\text{CaO})_3$
- Silicato bicálcico: $\text{SiO}_2 \cdot (\text{CaO})_2$
- Aluminato tricálcico: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{CaO})_3$
- Aluminato-Ferrito-tetracálcico: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot (\text{CaO})_4$

De esta manera, una vez que se obtiene el clinker se puede añadir yeso residual y cenizas provenientes de tratamientos térmicos, y el producto que se obtiene es un material llamado cemento Portland; ya que el beneficio que se alcanza al agregar las cenizas es la gran cantidad de cal que aportan al proceso (Castells, 2009, p. 133).

1.1.3.2. Obtención de hormigón y materiales de construcción

El hormigón es una mezcla de cemento, agregado (fino y grueso) y agua. Actualmente las mezclas de hormigón contienen adiciones tanto al cemento como al agregado fino y pasan a constituir una porción del material cementante del hormigón. Los residuos a mezclar son generalmente de origen natural, desechos industriales, o subproductos de diferentes procesos y de otras adiciones

puzolánicas, es un tema muy importante y está creciendo en relevancia día a día (Kovier y Roussel, 2011, pp. 12-13).

Las cenizas se pueden considerar como adición inerte, como adición parcial del cemento Portland, y como sustituto parcial del árido fino. Una ceniza que cumpla con los requisitos necesarios, puede utilizarse de estas tres maneras simultáneas, o de forma separables.

De esta manera las investigaciones se orientan a mejorar las características del hormigón en estado fresco, como en estado endurecido, que permitan optimizar algunas variables como el costo, la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad entre otras. Lo cual implica la necesidad de encontrar una dosificación que no interfiera de manera considerable con las propiedades mecánicas del hormigón (Bolívar, 2006, p.48).

Santaella y Salamanca. (2004), exponen que, la mejor dosificación encontrada en sustitución de arena por ceniza es la de 20%, debido a que los resultados obtenidos con dicha mezcla conservaron un crecimiento gradual respecto de otras variaciones de este tipo (p. 7).

Por otro lado, Uyhunoğlu et al. (2012) reportan un aumento en la resistencia a la compresión hasta un 12,31 % en la elaboración de prefabricados de hormigón cuando se sustituye en el orden del 10 % al 20 % de ceniza por agregado fino (p. 3).

La Figura 1.17 muestra como pueden variar las propiedades mecánicas, en este caso la resistencia a la compresión que se reportó en el estudio de Escalante (2002) para diversos sistemas cementosos con pequeñas fracciones o nada de cemento (p. 5).

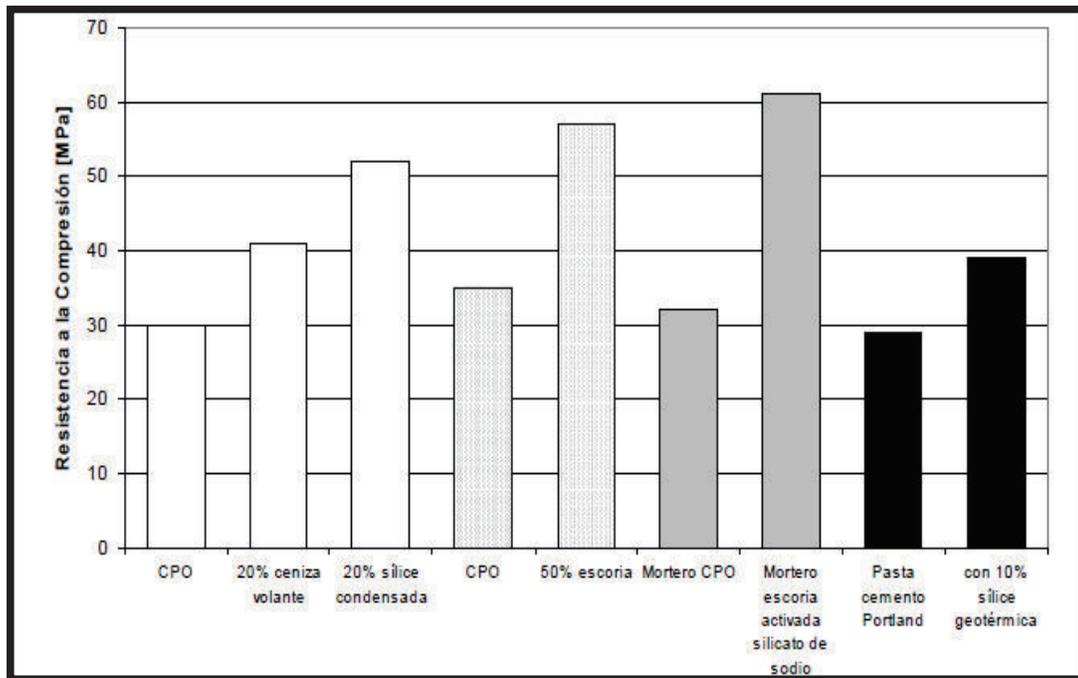


Figura 1.17. Resistencia a la compresión de diversos sistemas cementantes (Escalante, 2002)

1.2. ELABORACIÓN DE MAMPUESTOS

1.2.1. CONSIDERACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE MAMPUESTOS DE HORMIGÓN

1.2.1.1. Dosificación de la mezcla de hormigón

Para encontrar la dosificación definitiva de la mezcla de hormigón para la elaboración de los mampuestos se parte del Método ACI 211.1: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, del cual la forma más simple de trabajar es siguiendo el algoritmo presentado en la Figura 1.18 (Bolívar, 2006, p.6).

Dentro de la recolección de datos, lo que se busca es obtener valores mínimos para las variables que controlan este método, la elección de agregados de buena calidad y los demás materiales como el cemento, deben ir de acuerdo a la

resistencia que se desea ganar, al igual que los aditivos que en muchos casos se usan para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. Como última etapa, está la determinación de cada una de las propiedades de los materiales a usar (Herrera y Madrid, 2010, p. 18).

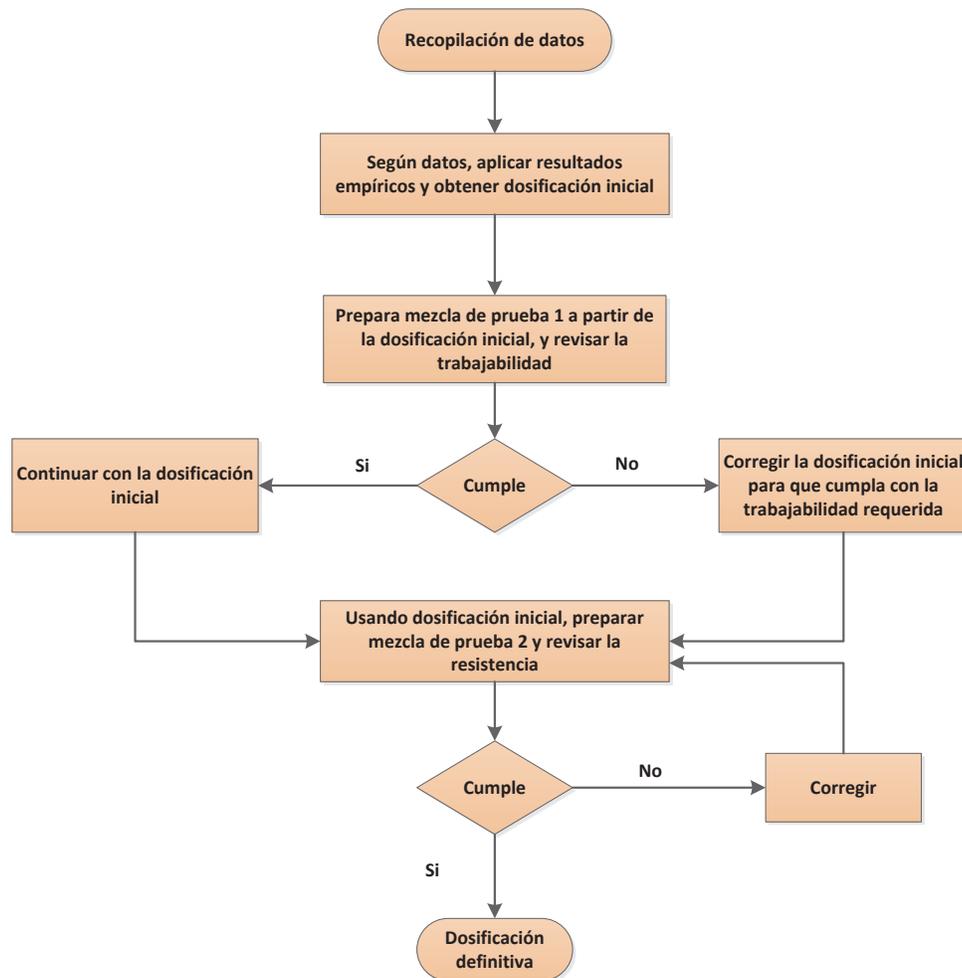


Figura 1.18. Algoritmo para el diseño de mezclas de hormigón por el método ACI 211.1 (Bolívar, 2006)

Las propiedades físicas destinadas para el control de la dosificación en cuanto a la elección de agregados que se encuentran como requisitos dentro de la norma NTE INEN 0872, son las siguientes:

Agregado Grueso

- Granulometría, tamaño máximo nominal del agregado

- Módulo de finura
- Masa unitaria
- Densidad
- Absorción de agua

Agregado fino

- Granulometría, módulo de finura
- Masa unitaria
- Densidad
- Absorción de agua

Para el cemento se necesita determinar la densidad real y su masa unitaria.

Gran parte de las características de las mezclas de hormigón, tanto en estado fresco como endurecido dependen de las propiedades de los agregados. Específicamente la granulometría y el tamaño máximo nominal influyen en la proporción de los agregados, como la cantidad de cemento y agua en la mezcla; también en la trabajabilidad, porosidad, contracción del cemento, resistencia, etc. Por lo tanto, los agregados deben tener partículas de diferentes tamaños con el fin de que las más finas ocupen los espacios dejados por las partículas gruesas evitando que se afecte la uniformidad de la mezcla y para verificar que los agregados sean aptos para el diseño de la mezcla de hormigón deben cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 872 (INEN 2011b, 2011, pp.2-5; Rivera, 2011, p.61).

1.2.1.2. Modelo de producción

El modelo de producción está definido por el tipo de mampuesto a elaborar, sus dimensiones y según su aplicación o uso. PCR (2012) señala que los mampuestos son piezas de gran atractivo, resistencia y durabilidad, debido a su variabilidad se los aplica en: viviendas, edificios, centros comerciales, colegios, iglesias, gimnasios, edificios industriales, oficinas, etc. Además que pueden dar

soluciones estructurales de una manera más técnica y económica que estructuras convencionales (pp. 1-2).

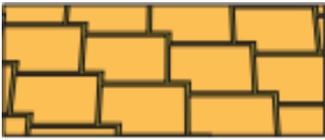
Existen algunos tipos de mampuestos como los siguientes:

- Bloques
- Ladrillo visto
- Adoquines
- Baldosas

En la Tabla 1.5 se detalla los tipos de adoquines por su forma y cada una de sus características.

Además se recomienda o se requiere que la relación existente entre la longitud y el ancho en el plano no sea mayor a 2, el espesor mínimo para tránsito peatonal sea de 60 mm y el espesor máximo sea de 100 mm. De igual manera se define el tipo de adoquín a usar mediante la clasificación en tránsito y el tipo, como se indica en la Tabla 1.6 (INEN, 1987b, pp. 2-3).

Tabla 1.5. Clasificación de adoquines por su forma

Tipo de adoquín	Forma	Característica
A		Se pueden colocar en estera, al unirse resisten la expansión de las juntas paralelamente, tanto en los ejes longitudinales como en los transversales de las unidades.
B		No se colocan en estera, al unirse resisten la expansión de las juntas paralelamente sólo en los ejes longitudinales de los adoquines, dependen de su presión al colocarlos para que se unan con las otras caras
C		Dependen de su precisión dimensional y de la precisión en su colocación para desarrollar el punteo

(Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma INEN 1483, 1987a, p.1)

Tabla 1.6. Clasificación de adoquines por su uso

Tipo de uso	Número de vehículos/día mayores a 3 t brutas	Equivalente total de repeticiones de eje estándar después de 20 años de servicio	Forma recomendada de adoquín	Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)
Peatonal	0	0	A, B, C	20
Estacionamiento y calles residenciales	0 - 150	$0 - 4,5 \times 10^5$	A, B, C	30
Calles principales y secundarias	150 - 1500	$4,5 \times 10^5 - 4,5 \times 10^8$	A	40

(Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma INEN 1488, 1987b, p. 3).

1.2.1.3. Etapas en la elaboración de adoquines

Luego de encontrar la dosificación definitiva de la mezcla y definir el tipo, uso y dimensiones del adoquín, se procede a elaborar los mismos mediante las etapas que intervienen en este proceso y que se describen a continuación:

- Mezclar los materiales en el orden (agregados, cemento y luego el agua respectivamente) y con tiempos que se detallan en las guías.
- Luego la mezcla pasa a la máquina vibrocompactadora donde las unidades se moldean de acuerdo a las dimensiones requeridas.
- La última etapa es el curado y almacenamiento de los especímenes, que se lo puede realizar de algunas maneras: vapor en cámaras a baja presión, vapor en autoclave o microaspersión en agua, en cámaras húmedas o riegos de agua en espacios abiertos (Herrera y Madrid, 2010, pp. 19-21).

1.2.2. CALIDAD DEL HORMIGÓN Y PROCESO DE ENCAPSULACIÓN

Determinar el rendimiento real y a largo plazo de los residuos solidificados / estabilizado no solo depende de realizar ensayos químicos, ya que éstos no pueden proporcionar por sí solos información sobre los cambios físicos entre los residuos y aditivos. Además, es muy complejo prever las tensiones ambientales en un período largo a las que se encontrarán expuestos los materiales estabilizados.

Por tanto, la evaluación del mecanismo de encapsulación requiere valorar también las propiedades físicas y estructurales del material estabilizado. Se utilizan una gran cantidad de ensayos en laboratorio, dependiendo de la aplicación en la que se desea emplear el residuo tratado, normalmente este tipo de ensayos son, químicos y físicos. (Lo, Tang, Li y Poon, 2000, p. 1; LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 771-772; Malviya y Chaudhary, 2006, p. 1).

1.2.2.1. Ensayos físicos

Para llevar a cabo el control de calidad del hormigón se toman muestras de éste, siendo necesario la preparación de probetas con características que dependen del tipo de ensayo a realizar y las características de los materiales pétreos a utilizar, con un mínimo de tres repeticiones por cada ensayo a realizar a 28 días de curado en estado endurecido e igual número de repeticiones para los ensayos en estado fresco (INECYC, 2009a, p. 1, Lafarge Ecuador, 2009, p. 24).

Siendo el hormigón un material preparado con elementos heterogéneos cuyas pruebas presentan variaciones las cuales no pueden ser controladas en su totalidad, no se debe limitar su aceptabilidad únicamente para aquellos hormigones cuyos valores de ensayos sean iguales o superiores a los requeridos (INECYC, 2009b, p. 9).

La evaluación física del hormigón como lo indica INECYC. (2009b), se lleva a cabo mediante el desarrollo de ensayos destructivos (resistencia a la compresión, resistencia por tracción indirecta, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción por flexión); y de ensayos no destructivos (densidad, velocidad sónica, adherencia), teniendo en cuenta la disponibilidad de equipamiento para desarrollar cada uno de estos ensayos (pp. 1-10). Además, la determinación de los ensayos en estado fresco (temperatura, contenido de aire y asentamiento), los cuales permiten mejorar la uniformidad de la mezcla a elaborar, verificando y ajustando las proporciones de sus componentes (Gutiérrez, 2003, p. 87).

Ensayos en estado fresco

Durante el período en el cual el hormigón se comporta como un líquido se lo denomina en “estado fresco”, este período puede durar entre 1 y 3 horas. Para determinar las propiedades en estado fresco se procederá a realizar los ensayos descritos en la Tabla 1.7 (Scanferla, 2009, p. 2; INECYC, 2009a, p. 4).

Tabla 1.7. Descripción de normas para ensayos en fresco

Norma	Descripción
INEN 1578	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento
ASTM C 1064	Método estándar para la temperatura de mezclas frescas de concreto
ASTM C 231	Método de prueba estándar para contenido de aire del hormigón fresco por el método de presión

Ensayos en estado endurecido

Cuando se realiza la estabilización de los residuos, se procura que estos materiales puedan soportar cargas de acuerdo a la aplicación que se les vaya a dar, los ensayos de resistencia proporciona una visión acerca de la eficacia de la

estabilización, la ductilidad/fragilidad del material estabilizado, y se encuentran correlacionados con la fijación de los contaminantes inorgánicos en la matriz hidratante (LaGrega, Buckingham y Evans, 1998, p. 789).

Para los estudios de los ensayos en estado endurecido, tanto destructivos como no destructivos se trabajará con las normas presentadas en la Tabla 1.8:

Tabla 1.8. Descripción de normas para ensayos en estado endurecido

Norma	Descripción
INEN 1573	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico
INEN 2554	Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. Utilizando una vigueta simplemente apoyada, con carga en los tercios.
ASTM C 496	Método de ensayo normalizado para resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto
ASTM C 900	Método de prueba estándar para la resistencia a la extracción de la barra corrugada en hormigón endurecido
ASTM C 642	Método de prueba estándar para la densidad, absorción, y poros en hormigón endurecido
ASTM D 2845	Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio de las velocidades de pulso ultrasónico y las constantes elásticas ultrasónicas de roca

1.2.2.2. Ensayo químico: TCLP (*Toxicity Characteristics Leaching Procedure*)

La estabilidad se determina con el grado de resistencia de la mezcla de residuos peligrosos y sustancias aglomerantes a la lixiviación mediante el método TCLP, el cual se encuentra normado por la EPA. La reducción de la facilidad de lixiviación se logra con la formación de una estructura cristalina o enlaces químicos que al combinarse con el componente peligroso, limitan así la cantidad de él que puede lixiviarse cuando agua o un ácido diluido se ponen en contacto con la matriz del residuo (Davis y Masten, 2005, p. 592).

1.2.3. NORMATIVA AMBIENTAL ACTUAL PARA RESIDUOS PELIGROSOS

Lo mencionado en el Acuerdo Ministerial No. 028, en su Sección II: Gestión Integral de Desechos Peligrosos y/o Especiales, Párrafo V de la eliminación y disposición final, art.128 respecto a la disposición final de este tipo de residuos, es parte de la normativa ambiental vigente en el Ecuador, sin embargo no existe una normativa ambiental acerca de los límites máximos permisibles de metales pesados para desechos industriales (peligrosos y/o especiales) en la zona de ubicación de la planta de GPOWERGROUP S.A., (La Joya de los Sachas, Orellana).

Tabla 1.9. Límites máximos permisibles en el extracto PECT (prueba de lixiviación) para metales pesados

Elemento	Límite máximo permisible Ordenanza No. 0404 (mg/L)
Arsénico	5,0
Bario	100,0
Cadmio	1,0
Cromo	5,0
Mercurio	0,2
Níquel	5,0
Plata	5,0
Plomo	5,0
Selenio	1,0

(Resolución 002-SA-2014, 2014, pp. 70-71)

Por lo tanto, para conocer si las sustancias que le otorgan características tóxicas al residuo no superan los límites de concentración por contaminante se compara los resultados obtenidos en el test de lixiviación con los límites máximos permisibles de la Tabla 1.9 establecidos en la Resolución No. 002-SA-2014, art 10: Norma Técnica Residuos Peligrosos correspondiente a la Ordenanza Metropolitana de Quito N° 0404, Reformatoria de la Ordenanza Metropolitana N°

213, sustitutiva del Título V “del Medio Ambiente” del Libro Segundo del Código Municipal.

De tal manera que, para suplir la falta de una normativa ambiental en la zona de trabajo, además de cumplir con la legislación ambiental en el país se propone utilizar lo mencionado en el párrafo anterior.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA CENIZA PROVENIENTE DEL PROCESO DE INCINERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE DESECHOS SÓLIDOS DE LA EMPRESA GPOWERGROUP S.A

2.1.1. MUESTREO DE LA CENIZA

Para efectuar la caracterización física y química en estado libre de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP S.A se realizó un muestreo compuesto de la misma, se procedió a tomar 5 muestras de 1 kg en intervalos de 4 h en el transcurso del día. Esta sistemática se la repitió por 15 días distintos al azar durante un mes y así obtener una muestra representativa. La muestra de ceniza se almacenó en fundas de plástico herméticas para evitar su derrame en el traslado hacia el laboratorio para su posterior caracterización (INEN 1501, 2011a, pp. 2-4).

En la muestra de ceniza se caracterizaron los siguientes parámetros químicos y físicos: su composición mineralógica, sus características químicas en cuanto a su toxicidad como residuo lixivante expuesto al ambiente, granulometría, densidad (real y aparente), porcentaje de vacíos y humedad; con el fin de utilizar estos parámetros para explicar el reemplazo del agregado fino por ceniza en la elaboración de la dosificación de la mezcla hormigón, así como explicar la influencia de la misma en los resultados de los ensayos mecánicos y de lixiviación del hormigón con ceniza (INEN, 2011b, p.8).

2.1.2. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA CENIZA

Para determinar los componentes cristalinos de las cenizas de incineración, se realizó el análisis por difracción de rayos X (DRX) de la muestra tomada de la

planta de GPOWERGROUP S.A. Se pulverizó la muestra en un equipo SIEB TECHNIK y un mortero de Agata con la finalidad de obtener un producto entre 30 – 38 micras, adecuado para ser apostado en el porta muestras. Esta muestra pulverizada (3 g aproximadamente) se la analizó mediante el difractor de rayos X, D8advance (Bruker axs), con monocromador $Cu\alpha$ ($\lambda=1.5418$ A), barrido desde 3 a 70° con pasos de 0,02° y 1 segundo por paso para determinar la composición de los componentes en la misma. Mientras que, para conocer cualitativamente los componentes cristalinos se manejó el programa Diffrac Plus. Este análisis descrito se lo realizó en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL LIXIVIADO DE LA CENIZA EN ESTADO LIBRE

Para conocer las características lixiviantes de la ceniza mediante la concentración de metales pesados, se realizó un análisis por el método EPA 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP).

El ensayo consistió en reducir el tamaño de partícula del residuo (sólo si es necesario) inferior a 9,5 mm. La muestra triturada se pesó y se mezcló con una cantidad de fluido extractante (solución obtenida mediante la dilución de 5,7 mL de ácido acético glacial con agua destilada hasta 1 L) a pH $2,88 \pm 0,02$ con una relación en peso de la fase líquido-sólido igual a 20. La mezcla se colocó en un sistema de agitación con ajuste automático de velocidad durante 18 h girando a 30 ± 2 rpm manteniendo la temperatura en 22 ± 3 °C para posteriormente filtrarla en un filtro de fibra de vidrio de 0,7 μ m.

Mediante la técnica de absorción atómica se analizó el extracto filtrado para la cuantificación en mg/L de arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, zinc y selenio. El análisis TCLP de la ceniza se encuentra dentro del criterio de peligrosidad CRETIB, código de clasificación que corresponde a las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad

y biológico-infeccioso de un desecho. Este análisis fue solicitado por la empresa GPOWERGROUP S.A al laboratorio CORPLABEC S.A y realizado en el mes de abril del 2014. Los resultados presentados en el punto 3.1.2 se compararon con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 002-SA-2014, art 10: Norma Técnica Residuos Peligrosos definidos en la Sección 1.2.3.

2.1.4. GRANULOMETRÍA DE LA CENIZA

Para determinar la granulometría de la ceniza generada por la incineración de residuos en bruto en la planta de GPOWERGROUP S.A se efectuó la norma INEN 696: *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso, con tamices Tyler*, cuyo detalle se encuentra en la Tabla A1.1 del Anexo I. El ensayo consistió en emplear una cantidad conocida de muestra, la cual se separó de manera mecánica por medio de una serie de tamices Tyler de diferentes tamaños de mallas, en orden decreciente, montados en un equipo VIBROMATIZ ATM ARROW. Se colocó una cantidad aproximada de 100 g de muestra en el tamiz superior de la serie y se dejó operar por 15 minutos y se registró cada uno de los pesos de las fracciones retenidas en cada tamiz.

La curva granulométrica se obtuvo graficando la fracción en porcentaje del material que pasa en cada tamiz en función de la abertura del mismo (mm) y se utilizó para determinar el d_{80} de la ceniza. El ensayo descrito al igual que el ensayo para determinar la densidad real y aparente de la ceniza se lo realizó por triplicado y se efectuó en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.

2.1.5. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL, MASA UNITARIA (DENSIDAD APARENTE) Y PORCENTAJE DE VACÍOS DE LA CENIZA

Para la densidad real de la ceniza se recurrió al método del picnómetro recuperado de la norma INEN 856: *Determinación de la densidad, densidad*

relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. Inicialmente se pesó el picnómetro vacío en una balanza analítica SARTORIUS TE1245, se colocó 1 gramo de la muestra y se registró su peso. Posteriormente se llenó el picnómetro con agua destilada y se registró el peso. Se vació el picnómetro y se llenó con agua destilada para obtener su peso. Finalmente los valores registrados se introdujeron en la Ecuación 2.1 para calcular la densidad de la muestra en g/cm^3 (INEN, 2010a, p.1).

$$\delta = \frac{1}{1 + \left(\frac{W_{pa} - W_{pa+m}}{W_{pm} + W_p} \right)} \quad [2.1]$$

Donde:

δ : densidad real de la ceniza (g/cm^3)

W_p : peso del picnómetro (g)

W_{pm} : peso del picnómetro + muestra (g)

W_{pa} : peso del picnómetro + agua (g)

W_{pa+m} : peso del picnómetro + agua + muestra (g)

Obtenido el valor de la densidad real se procedió a efectuar el procedimiento para la determinación de la densidad aparente y porcentaje de vacíos de la ceniza mediante la norma INEN 858: *Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y porcentaje de vacíos.*

Se taró una probeta de 50 mL en una balanza analítica SARTORIUS TE1245 en la que se colocó la cantidad necesaria de material hasta completar un volumen entre 30 y 40 mL. Se registró el peso y para el cálculo del valor de la densidad aparente (M), se dividió este valor para el volumen alcanzado. Una vez que se obtuvo el valor de la masa unitaria (M) se procedió a calcular el porcentaje de vacíos de la ceniza utilizando la Ecuación 2.2 (INEN, 2010b, pp.1-4).

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{[(SxM) - Da]}{(S - Da)} * 100 \quad [2.2]$$

Donde:

M : masa unitaria (densidad aparente) de la ceniza (g/cm^3)
 S : densidad real de la ceniza (g/cm^3)
 D_a : densidad del agua (g/cm^3)
 $\% \text{ Vacíos}$: espacio libre en la ceniza (%)

2.1.6. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA CENIZA

Para determinar la humedad de la ceniza se empleó el procedimiento descrito en la norma INEN 862: *Áridos para el hormigón. Determinación del contenido total de humedad*.

- Se tomaron tres muestras, cada una de ellas con una cantidad de material ente 20 – 30 g contenido en un recipiente metálico.
- Las muestras se sometieron por un tiempo de 2 h a $110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura.
- Cada muestra se retiró y se registró el peso del recipiente con el material seco.
- Para el cálculo del contenido de humedad de la ceniza se emplearon las Ecuaciones 2.3 y 2.4 (INEN, 2011d, p.1):

$$\text{peso de agua} = P_2 - P_3 \quad [2.3]$$

$$W = \frac{(P_2 - P_3)}{P_1} \times 100 \quad [2.4]$$

Donde:

P_1 : Peso de la muestra húmeda (g)
 P_2 : Peso de la muestra húmeda + recipiente (g)
 P_3 : Peso muestra seca + recipiente (g)
 W : Contenido de humedad (%)

2.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE SUSTITUCIÓN DE CENIZA COMO AGREGADO FINO PARA HORMIGÓN EN LA FABRICACIÓN DE MAMPUESTOS MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CON CENIZAS RESPECTO AL HORMIGÓN CONVENCIONAL

2.2.1. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y CON CENIZA

Para el diseño de las mezclas de hormigón convencional y con ceniza se utilizó el método ACI 211.1: *Standard Practice for Selecting proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*; este diseño fue elaborado para obtener un hormigón cuyo requerimiento de resistencia a la compresión sea de 210 kg/cm², los valores de las propiedades físicas de los materiales utilizados para el diseño se presentan en la Tabla 3.5 (ACI, 2002, pp. 7-11).

Partiendo de este método se realizaron los siguientes pasos:

- 1) De la Tabla AII.1 del Anexo II se eligió el asentamiento entre 7,6 – 10,2 cm, de acuerdo al tipo de trabajo a emplear con hormigón.
- 2) Luego se seleccionó el tamaño máximo nominal del agregado utilizando la Tabla AII.2 del Anexo II, en esta parte se debe considerar la disponibilidad económica y a la vez compatibilidad con las dimensiones de los moldes a elaborar, el cual no debe exceder la quinta parte de la menor dimensión de los mismos. Se eligió el agregado de 1 pulgada de acuerdo a la granulometría realizada.
- 3) El siguiente paso consistió en estimar las cantidades aproximadas de agua de mezclado (193 dm³), contenido de aire a partir del asentamiento y del tamaño de agregado grueso seleccionado (1,5 %) empleando la Tabla AII.3 del Anexo II.
- 4) Luego de estimar la cantidad de agua de mezclado se procedió a la selección de la relación agua/cemento empleando la Tabla AII.4

(Relaciones agua/cemento máximas permisibles para la elaboración de adoquines) del Anexo II. Para este caso se asumió que el hormigón elaborado no iba a estar expuesto a las condiciones descritas en la Tabla All.4, en consecuencia a esto se indicó que, la relación agua/cemento se escoge de acuerdo a las exigencias de la resistencia a la compresión. Por lo tanto, empleando la Tabla All.5 para un hormigón de 210 kg/cm^2 corresponde el valor de 0,623 para la relación agua/cemento.

- 5) Se obtuvo el valor del volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón 640 dm^3 , empleando la Tabla All.6 del Anexo II, utilizando los valores de módulo de finura del agregado fino (3,0) y el tamaño máximo de agregado a usar (1 pulgada).
- 6) Con los datos obtenidos de: tamaño máximo y volumen de agregado grueso, asentamiento, relación agua/cemento, cantidad de agua y contenido de aire atrapado teórico se procedió al cálculo de la dosificación definitiva del hormigón cumpliendo con el algoritmo presentado en la Sección 1.2.1.1.
- 7) Para el hormigón con ceniza se utilizó la dosificación del hormigón convencional y con base en ésta se reemplazó en peso la ceniza por árido fino en porcentajes de 15 %, 20 %, 25%, 30 % para su posterior elaboración. Además, se elaboró una dosificación extra con 10% de ceniza para llevar a cabo la evaluación de la lixiviación de los metales pesados en el residuo encapsulado.

2.2.2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULAMIENTO CON HORMIGÓN

Para la evaluación del proceso de encapsulación se interpretaron los resultados de dos parámetros: el comportamiento de las propiedades mecánicas del hormigón con y sin ceniza tanto en estado fresco como en estado endurecido, siguiendo la metodología de las normas descritas en la Sección 1.2.2.1 y la concentración de metales pesados: arsénico, cromo, bario, plata, plomo, mercurio, selenio y níquel en los lixiviados. Los ensayos en estado fresco y

endurecido se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiente de la Escuela Politécnica Nacional.

2.2.2.1. Evaluación de los ensayos en hormigón fresco

✓ Asentamiento del hormigón

Para la determinación del asentamiento de la mezcla fresca del hormigón se realizaron los pasos de la norma INEN 1578: *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.*

- Mediante un cono estandarizado (cono de Abrams) el cual se humedeció y se colocó sobre una superficie libre de vibraciones cuya área era superior a la base del mismo, se colocó cantidades de hormigón recién mezclado en cada tercio de su capacidad compactándolo con una varilla de acero de 16 mm de diámetro, 60 cm de longitud y de extremo redondeado, dando 25 golpes repartidos uniformemente por toda la superficie, procurando mantener el cono firme en su posición original mediante las aletas inferiores como se muestra en la Figura AIII.1 del Anexo III.
- Una vez lleno el molde y retirado su exceso, se levantó el molde con dirección vertical teniendo cuidado de mover el hormigón. Se midió la distancia vertical entre la altura original y la del centro desplazado de la superficie del hormigón.
- Este procedimiento se lo realizó por triplicado, teniendo en cuenta de que se lo debe realizar antes de que empiece a fraguar la mezcla de hormigón

✓ Temperatura del hormigón

Para la determinación de la temperatura de la mezcla fresca del hormigón se efectuaron los pasos descritos en la norma ASTM C1064: *Método de prueba estándar para la temperatura de mezclas frescas de concreto.*

- Se tomó una muestra del hormigón recién mezclado procurando que el dispositivo de medición de temperatura se encontrara recubierto al menos 75 mm en todas las direcciones alrededor de él.
- Se utilizó un termómetro de bulbo de mercurio con una precisión de $\pm 0,5$ °C, el cual se procedió a colocar dentro de la mezcla fresca del hormigón por un período mínimo de 2 minutos hasta que la temperatura se estabilizó y se registró su lectura.
- Se completó el ensayo hasta obtener tres mediciones.

✓ **Contenido de aire en el hormigón**

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C 231: Método de prueba estándar para contenido de aire del hormigón fresco por el método de presión.

- Se utilizó un equipo que consta de un recipiente cilíndrico con tapa hermética más unos accesorios que permitían aplicar presión como se muestra en la Figura AIII.2 del Anexo III. El recipiente se llenó en dos capas con la mezcla de hormigón fresco, se compactó cada capa con 25 golpes utilizando una varilla de acero, se enrasó el recipiente y se tapó.
- Posteriormente, se llenó con agua el volumen inferior de la tapa hasta que se purgó el líquido a través de las válvulas del equipo.
- Se cerraron las válvulas y se bombeó aire hasta su lectura inicial. Se conectó la cámara de presión al recipiente, se registró el valor que indicaba el manómetro y se liberó la presión en el equipo.

2.2.2.2. Evaluación de los ensayos en hormigón endurecido

Para los ensayos realizados en hormigón endurecido se utilizaron probetas cilíndricas 150 mm de diámetro y 300 mm de altura; viguetas de (15 mm x 15 mm

x 60 mm) y (10 mm x 10 mm x 40 mm) de ancho, alto y largo respectivamente, siguiendo la norma INEN 1576: Hormigón de cemento hidráulico. *Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.*

Esta etapa consistió en preparar los moldes, cubriéndolos con una capa de aceite muy delgada en su interior. Para que la forma de los moldes sea lo más ajustada a las medidas necesarias, se aseguraron las bisagras y los pernos de los encofrados laterales de cada uno éstos. Luego se procedió a verificar la forma y dimensiones de éstas (INEN, 2011e, p.1).

Para la fabricación de las probetas se colocó el hormigón en 3 capas iguales, proporcionándoles 25 golpes por cada capa con una varilla de acero, de iguales características a la que se usó en el ensayo de asentamiento en la Sección 2.2.2.1. Para las viguetas se colocó el hormigón en dos capas iguales compactadas con aproximadamente 75 golpes.



Figura 2.1. Preparación de probetas cilíndricas y viguetas para ensayos del hormigón en estado endurecido

Una vez realizada la compactación se retiró el exceso de hormigón de tal manera que los moldes queden perfectamente llenos y enrasados como se aprecia en la Figura 2.1. Después de almacenar las probetas cilíndricas y las viguetas durante un período de 24 h en un ambiente húmedo, se removió cuidadosamente cada uno de los especímenes de los moldes evitando que se afecte su forma.

Los cilindros y las viguetas tuvieron un período de curado en una piscina, Figura 2.2, en la cual sus superficies se mantuvieron con agua libre hasta las fechas de ensayo.



Figura 2.2. Curado de especímenes (probetas cilíndricas y viguetas)

✓ Resistencia a la compresión

Para la determinación de la resistencia a la compresión se efectuó la metodología descrita en la norma INEN 1573: *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión ($f'c$) de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*. Una vez concluido, la etapa de curado a 3, 7, 14 y 28 días de las probetas cilíndricas de hormigón con y sin ceniza, la metodología a seguir consistió en (INEN, 2010d, pp.6-7):

- Centrar la probeta de ensayo con respecto a la placa descarga de la prensa SUZPECAR, modelo CMH-120, capacidad de 120 MPa como se muestra en la Figura AIII.3 del Anexo III.
- Se aplicó una carga axial de compresión al cilindro en un rango de velocidad definido de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s hasta que falló el cilindro.
- Se registraron los valores de carga y para determinar el valor de resistencia a la compresión ($f'c$) se dividió la carga aplicada para el área transversal como se indica en la Ecuación 2.5.
- Posteriormente se graficó la curva de endurecimiento para cada una de las mezclas de hormigón convencional y con ceniza mostrada en la Sección 3.3.2.1.

$$f'c = \frac{P}{As}$$

[2.5]

Donde:

$f'c$: resistencia a la compresión (kg/cm²)
 P : carga máxima aplicada (kg/cm²)
 A_s área transversal (cm²)

✓ **Módulo de elasticidad**

Para determinar el módulo de elasticidad se preparó la probeta colocándole un medidor de deformación Strain Gauge TLM PL-10 en el centro de ésta, se conectaron los terminales del medidor de deformación a los del equipo BRUEL & KJAER type 1526 Strain Indicator y se encendió el equipo.

- Se montó la probeta centrándola de igual manera como se hizo en el ensayo de compresión y se aplicó una carga axial incrementada gradualmente en tres ciclos, el primero hasta 5 MPa, el segundo hasta 10 MPa y el tercero hasta que se produjo el falló de la misma como se indica en la Figura AIII.4 del Anexo III.
- Se registraron los valores de deformaciones tanto transversales como longitudinales durante la aplicación de la carga.
- Con los valores registrados se procedió a graficar el esfuerzo respecto de la deformación y el módulo de elasticidad se determinó mediante la pendiente de la zona lineal de la gráfica como se indica en el Anexo V.

✓ **Resistencia a la tracción indirecta (*ensayo brasilero*)**

Para la determinación de la resistencia a la tracción indirecta por la norma ASTM C 496: *Método de ensayo normalizado para resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*. El procedimiento empleado es el brasilero o tracción indirecta, el cual consistió en colocar la probeta cilíndrica de manera longitudinal sobre un apoyo suplementario, una vez centrado el sistema y ajustado a la placa de la prensa se aplicó a la probeta cilíndrica una carga lineal

de compresión a lo largo de dos ejes longitudinales opuestos como se muestra en la Figura AIII.5 del Anexo III, se registró el valor de la carga máxima aplicada y mediante la Ecuación 2.6 se determinó el valor de resistencia a la tracción indirecta.

$$f't = \frac{2P}{\pi LD} \quad [2.6]$$

Donde:

$f't$: resistencia a la tracción indirecta (kg/cm^2)
 P : carga máxima aplicada (kg/cm^2)
 L : longitud del cilindro (cm)
 D : diámetro del cilindro (cm)

✓ Ensayo de resistencia a flexión

Para determinar la resistencia a flexión del hormigón, se procede siguiendo lo descrito en la norma INEN 2554: *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón*. Terminado el proceso de curado a 28 días de las viguetas, el procedimiento a seguir consistió en:

- Dividir la vigueta en tercios de luz libre teniendo en cuenta que debe existir una holgura entre el espécimen a ensayar y los apoyos no menor a 25 mm.
- Se llevó los apoyos de aplicación de la carga, al contacto con la superficie de la vigueta en los tercios de luz libre y sobre estos se colocó una placa de acero rígida como se muestra en la Figura AIII.6 del Anexo III.
- Se procedió a aplicar una carga axial entre 0,11 a 15,0 kN/s carga hasta que se produjo la falla.
- Obtenido el valor de la carga aplicada se calculó el módulo de rotura utilizando la Ecuación 2.7 (INEN, 2011f, pp.3-4).

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad [2.7]$$

Donde:

<i>MR</i> :	módulo de rotura (kg/cm ²)
<i>P</i> :	carga máxima aplicada (kg/cm ²)
<i>L</i> :	luz libre entre apoyos (cm)
<i>b</i> :	ancho de la viga (cm)
<i>d</i> :	altura de la viga (cm)

✓ Esfuerzo de adherencia

Para determinar la adherencia del acero al concreto, conocida también como rotura por deslizamiento de la armadura dentro del hormigón (PULL-OUT), se efectuó la metodología descrita en la norma ASTM C 900: *Método de prueba estándar para la resistencia a la extracción de la barra corrugada en hormigón endurecido*. El procedimiento se lo realizó por triplicado y consistió en:

- Colocar una barra de acero de 1 cm diámetro y de 60 cm de longitud aproximadamente 20 diámetros en la probeta cilíndrica de hormigón con y sin ceniza, se dejó curar por 28 días.
- Se acondicionó la probeta en el equipo SUZPECAR, se aplicó una carga creciente de tracción en uno de los extremos de la barra hasta que se produjo el arrancamiento de la misma como se muestra en la Figura AIII.7 del Anexo III.
- Se registró el valor de la carga y se calculó la resistencia nominal en tracción por medio de la Ecuación 2.8.

$$N = f_s * A_s \quad [2.8]$$

Una vez calculado la resistencia nominal de tracción, se determinó el valor del esfuerzo de adherencia por medio de la Ecuación 2.9. Adicionalmente, se tomó en consideración el estudio de Lema y Chacón (2012), donde se determinó el valor del esfuerzo de adherencia como uniforme a lo largo de toda la barra, equivalente a la variación real (p.92).

$$\mu = \frac{N}{\pi L \phi} \quad [2.9]$$

Donde:

- μ : esfuerzo de adherencia (kg/cm²)
- N : resistencia nominal de tracción (kg/cm²)
- f_s : resistencia específica a la tracción (kg/cm²)
- A_s : área superficial de la barra (cm²)
- L : longitud de la barra que penetra el concreto (cm)
- ϕ : diámetro de la barra (cm)

✓ Velocidad sónica

El procedimiento empleado para la determinación de la velocidad sónica se describe en la norma ASTM D 2845: *Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio de las velocidades de pulso y las constantes elásticas ultrasónicas de roca.*

- Se verificó que el equipo TERRATEST, se encuentre encerado, inmediatamente después se colocó cada uno de los palpadores en el centro de los extremos de la probeta cilíndrica como se muestra en la Figura AIII.7 del Anexo III.
- Se determinó eléctricamente el tiempo en microsegundos que tarda el pulso en recorrer el espacio entre los dos palpadores.
- Se registró el valor que indicó el equipo y se calculó la velocidad sónica con la Ecuación 2.10.

$$V_s = \frac{L_s}{T_s} \quad [2.10]$$

Donde:

- V_s : velocidad sónica (m/s)
- L_s : distancia recorrida por el pulso (m)

T_s : tiempo efectivo del pulso (s)

✓ **Densidad y absorción**

El procedimiento empleado para la determinación de la densidad y absorción en estado endurecido del hormigón con y sin ceniza se describe en la norma ASTM C 642: *Método de prueba estándar para la densidad, absorción, y poros en hormigón endurecido*.

- Se secó la probeta a ensayar en la estufa GCA PRECISION SCIENTIFIC, a una temperatura de 110 ± 5 °C durante un tiempo no menor a 24 h.
- Posteriormente se retiró la probeta, se dejó enfriar y se determinó su masa (A) en una balanza SARTORIUS con capacidad de 16 kg, con una precisión de 0,1 g.
- Una vez realizado el paso anterior se procedió a sumergir la probeta de ensayo en agua durante un tiempo no menor a 48 h, luego de transcurrido este tiempo se retiró la probeta del agua, se secó su superficie con una toalla y se determinó su masa superficialmente seca después de la inmersión (B).
- El siguiente paso consistió en colocar la probeta en un recipiente metálico con agua en la estufa y se dejó hervir durante 5 h, transcurrido el tiempo se retiró la probeta de la estufa, se dejó enfriar retirando cualquier humedad con una toalla y se determinó su masa (C).
- Como último paso se suspendió la probeta cilíndrica en agua para determinar su masa aparente en agua después de la inmersión y ebullición (D) como se muestra en la Figura AIII.8 del Anexo III.
- Con los datos anteriores se determinaron los valores de densidad (seca, superficialmente seca o después de la inmersión, después de la inmersión y ebullición) mediante las Ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13, para la absorción y volumen de poros se utilizaron las Ecuaciones, 2.14 y 2.15 respectivamente.

$$g_1 = \left[\frac{A}{C-D} \right] * \rho \quad [2.11]$$

$$g_2 = \left[\frac{B}{C-D} \right] * \rho \quad [2.12]$$

$$g_3 = \left[\frac{C}{C-D} \right] * \rho \quad [2.13]$$

$$A_b = \left[\frac{C-A}{A} \right] * 100 \quad [2.14]$$

$$V_p = \left[\frac{C-A}{C-D} \right] * 100 \quad [2.15]$$

Donde:

- A*: masa de la muestra secada al horno (g)
- B*: masa de la muestra saturada y seca superficialmente en el aire después de la inmersión (g)
- C*: masa de la muestra seca superficialmente en aire después de la ebullición (g)
- D*: masa aparente de la muestra en agua después de la inmersión y ebullición (g)
- g_1 : densidad específica seca (g/cm³)
- g_2 : densidad específica S.S.S (g/cm³)
- g_3 : densidad específica después de inmersión y de ebullición (g/cm³)
- V_p : porosidad (%)
- Ab*: absorción de agua (%)
- ρ : densidad del agua (g/cm³)

2.2.3. EVALUACIÓN DEL RESIDUO ENCAPSULADO A PARTIR DE LA LIXIVIACIÓN DE METALES PESADOS

Una vez obtenido los resultados de las propiedades mecánicas del hormigón convencional y con ceniza, se llevó a cabo la determinación de la concentración de metales: arsénico bario, cromo, níquel, plomo, mercurio, selenio y plata, en los

lixiviados de las dosificaciones de hormigón con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza mediante el análisis (TCLP) correspondiente al Método EPA 1311. Este rango de trabajo se escogió con base en las comparaciones de las propiedades mecánicas del hormigón convencional y con ceniza, considerando que se obtuvieron mejores resultados reemplazando agregado fino en un 15 % en peso por ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A.

Las muestras con 10 % y 20 % se utilizaron para comparar la lixiviación entre un límite superior e inferior respecto de la dosificación aceptada. Además, se evaluó el porcentaje de reducción de metales pesados del residuo encapsulado respecto del residuo en su forma libre mediante la Ecuación 2.16 y los resultados obtenidos se compararon con los límites máximos permisibles de la norma técnica de residuos peligrosos establecidos en la Resolución No. 002-SA-2014 correspondiente a la Ordenanza No. 404 del Distrito Metropolitano de Quito.

$$R(\%) = \frac{Cm_0 - Cm_f}{Cm_0} * 100 \quad [2.16]$$

Donde:

- R : Porcentaje de reducción de lixiviados
 Cm_0 : Concentración de metal pesado en lixiviados de ceniza sin encapsular (g/mL)
 Cm_f : Concentración de metal pesado en lixiviados de ceniza encapsulado (g/mL)

2.3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO PARA LA FABRICACIÓN DE MAMPUESTOS

Siguiendo el orden de la Figura 2.3 en la cual se presentan las operaciones unitarias consideradas para el proceso del tratamiento de 170 kg de ceniza generada diariamente por la incineración en bruto de residuos industriales en la planta de la empresa GPOWERGROUP S.A, se realizó el diseño conceptual de

una planta piloto con una capacidad de producción de 900 adoquines diarios de hormigón con 15 % de ceniza en reemplazo de agregado fino.



Figura 2.3. Operaciones unitarias consideradas en el diseño de la planta piloto de tratamiento de cenizas provenientes del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP S.A

Los flujos de entrada y salida en cada operación unitaria presente en el diagrama de la Figura 2.3 se elaboraron con base en la ecuación general del balance de masa, considerando que dentro de las fases del proceso no se produjo ningún tipo de reacción química, es decir, no hubo consumo ni generación de masa la Ecuación 2.17 se simplifica a:

$$A = E - S \quad [2.17]$$

Dónde:

- A*: acumulación
- E*: entrada de masa
- S*: salida de masa

Obtenidos los flujos de entrada y salida requeridos, se realizó los diagramas BFD y PFD para la planta piloto bajo la norma ANSI Y32.11, los diagramas mencionados se visualizan en la Figura 3.21 y 3.22 respectivamente.

Se realizó una descripción detallada de la operatividad de la planta piloto para la elaboración de adoquines tomando en cuenta que ésta se implementaría en un área correspondiente a 1200 m² dentro de la planta de GPOWERGROUP S.A como se indica en la Figura 3.13. Con base en la información obtenida de los flujos de entrada y salida en cada balance de masa de la Sección 3.4.2 y las consideraciones adicionales descritas en la Sección 3.4.5, se procedió a

dimensionar los equipos requeridos: criba vibratoria, trituradora de mandíbulas, mezcladora, banda transportadora y un vibrocompresor.

Una vez que se determinaron las capacidades de cada uno de los equipos, se procedió a buscar catálogos de los mismos en el mercado que cumplan con lo establecido en el dimensionamiento. Las hojas técnicas de los equipos seleccionados se muestran en las Tablas 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 y 3.30 respectivamente. Por último, con la información obtenida, se elaboró el diagrama de distribución en planta *Lay out* presentado en la Figura 3.24.

2.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PLANTA PILOTO

Una vez realizado el estudio técnico del diseño de la planta piloto para la fabricación de 900 mampuestos (adoquines) diarios de hormigón con ceniza. Se efectuó la evaluación económica de la misma en la que se estableció la factibilidad de ejecución de la planta piloto para el tratamiento de ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de la empresa GPOWERGROUP S.A.

El estudio económico se lo realizó considerando:

- La necesidad de una inversión inicial (costos fijos), rubros en construcciones, equipos, instalación de equipos, tuberías y accesorios, capital de operación como se indica en la Tabla 3.36
- Costos de operación de la planta: materia prima, servicios industriales, personal, depreciación de los activos y mantenimiento, presentados en la Tabla 3.39 (Narváez, 2012, pp.65-72; Guerra, 2013).
- El costo que representaría tratar este tipo de residuo y no elaborar el proyecto.
- Finalmente el beneficio que obtendría la empresa GPOWERGROUP S.A en materia ambiental.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DEL PROCESO DE INCINERACIÓN DE LA PLANTA DE GPOWERGROUP S.A

La combustión originada al interior del horno de la planta de GPOWERGROUP S.A, genera un tipo de residuo de color negro ilustrado en la Figura 3.1, con un tamaño de partícula menor a 0,5 mm, el cual se deposita en las bandejas de recolección para su posterior traslado y su disposición final.



Figura 3.1. Ceniza recolectada del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP

3.1.1. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA CENIZA

En la Tabla 3.1 se detallan los compuestos cristalinos definidos en la ceniza del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP S.A.

Tabla 3.1. Contenido mineralógico de las cenizas del proceso de incineración de la planta GPOWERGROUP S.A

Mineral	Fórmula	Composición (%)
Grupo plagioclasa (albita, andesina, anortita)	$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	35
Cuarzo	SiO_2	29
Hematita	Fe_2O_3	1
Diopside	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	22
Wallastonite	CaSiO_3	6
Grupo feldespato (microclino, ortoclasa, sanidine)	KAlSi_3O_8	5
Geothita	$\text{FeO}(\text{OH})$	2

De acuerdo al análisis realizado por el Laboratorio del Departamento Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, la ceniza presenta altos contenidos de la fase amorfa que no pueden ser cuantificados por esta técnica debido a que su alcance de análisis no lo permite. Sin embargo, en la fracción de componentes con cristalización definida se encontraron óxidos complejos, compuestos por calcio, aluminio, potasio, sodio, magnesio, silicio (KAlSi_3O_8 , $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$).

Se puede observar también que posee una cantidad representativa de fase aluminosilicatada y que en estas proporciones junto con el cuarzo tienen un potencial en aplicaciones cerámicas, vidrio y además usadas en la fabricación mampuestos de hormigón por ser más ligeros.

Por otra parte, la norma ASTM C618: *Especificación normalizada de ceniza volante de carbón y puzolana natural en crudo o calcinada para uso de concreto*, clasifica a la ceniza en dos tipos principalmente, mediante la suma de: óxido de sílice, óxido de hierro y óxido de aluminio dentro de su composición química. De acuerdo a esto, si la suma de los tres óxidos es mínimo un 50 % o 70 % se habla

de una ceniza tipo C, (N y F) respectivamente, tal como se presenta en la tabla A1.3 del Anexo I.

Como se indica en la Tabla 3.1 la cantidad de óxido de sílice, óxido de hierro corresponden a 29% y 1%, mientras que, el grupo plagiosita corresponde al 35% de la composición de la ceniza. Dentro de este grupo existe un 67,39% más de óxido de silicio y un 20,35% de óxido de aluminio, es decir, 19,60% y 8,48% de estos compuestos respectivamente en la ceniza; que sumados a los porcentajes antes mencionados corresponden a un total de 58,10%. Por lo tanto, la ceniza generada en el proceso de incineración en bruto de residuos industriales de la planta de GPOWERGROUP S.A es de tipo C, según lo estipulado en la norma ASTM C618 (ASTM, 2012, p. 2; Ibañez, Gisbert y Moreno, 2011, p. 6).

3.1.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS DEL LIXIVIADO DE LA CENIZA EN ESTADO LIBRE

La determinación de la concentración de metales pesados del lixiviado de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A, se efectuó con la finalidad de establecer una comparación con los límites máximos permisibles establecidos en la norma técnica de desechos peligrosos establecidos Resolución 002-SA-2014, art 10 correspondientes a la Ordenanza No. 0404 del Distrito Metropolitano de Quito. Los resultados obtenidos por el ensayo TCLP, como la comparación con los valores de límites máximos permisibles de la norma técnica se presentan en la Tabla 3.2.

Las concentraciones de: arsénico (<0,010 mg/L), bario (11,000 mg/l), cadmio (0,020 mg/L), cromo (<0,050 mg/L), mercurio (0,007 mg/L), níquel (0,046 mg/L), plata (<0,010 mg/L), plomo (0,230 mg/L) y selenio (<0,010 mg/L) estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la norma técnica de desechos peligrosos de la Ordenanza No. 0404 según el test de lixiviación, lo cual indica que bajo este criterio las cenizas del proceso de incineración de la planta

de GPOWERGROUP S.A cumplen con la normativa ambiental respecto a su característica lixiviante.

Como casos particulares, la concentración de cromo es de la especie hexavalente y no total, reportado por el laboratorio en el cual se realizó el ensayo TCLP de la ceniza en estado libre, sin embargo, al comparar este resultado con la norma, el valor no excede a la misma.

Tabla 3.2. Resultados de concentración de metales pesados del extracto lixiviado de las cenizas en estado libre y comparación con la norma técnica de desechos peligrosos de la Ordenanza No. 0404

Elemento	Contenido de extracto lixiviado (mg/L)	¹Límite máximo permisible (mg/L)
Arsénico	<0,010	5,0
Bario	11,000	100,0
Cadmio	<0,020	1,0
Cromo hexavalente	<0,050	5,0
Mercurio	0,007	0,2
Níquel	0,460	5,0
Plata	<0,010	5,0
Plomo	0,230	5,0
Selenio	<0,010	1,0

¹(Resolución 002-SA-2014, 2014, pp. 70-71)

Al mismo tiempo, se observa en la Tabla 3.2 que existe una concentración de bario en la ceniza (11,00 mg/L) que comparada con el resto de metales pesados cuyo nivel es inferior al límite máximo permisible, esta concentración de bario es superior. La fuente de bario se puede acreditar a la composición de la mezcla de desechos a incinerar entre los cuales se encuentran: lodos, arena, arcillas y vegetación contaminada con hidrocarburos; pinturas, residuales de aceites y

lubricantes; cartón, papel y relacionados que se encuentren contaminados con hidrocarburos (Gpower, 2013, p.278; Sigler y Bauder, 2012, p.1).

De acuerdo a lo establecido en el art. 10 de la Resolución No. 002-SA-2014, Norma Técnica de Residuos Peligrosos, literal 6: Procedimiento para declarar a un desecho peligroso como no peligroso o especial, dicho procedimiento permite declarar a un desecho peligroso como especial: *“Sí, el desecho considerado peligroso por toxicidad cumple con las concentraciones máximas permisibles por contaminante determinadas en dicha norma”*.

De igual manera, el Acuerdo Ministerial No. 028, Sección II: Gestión Integral de Desechos Peligrosos y/o Especiales, art. 84, literal b), considera como desecho especial: *“Aquellos cuyo contenido de sustancias tengan características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables, biológico-infecciosas y/o radioactivas, no superen los límites de concentración establecidos en la normativa ambiental nacional o en su defecto la normativa internacional aplicable”*.

A partir de lo mencionado en el párrafo anterior junto a los resultados obtenidos de la caracterización tóxica de la ceniza en estado libre, se concluye que este tipo de residuo tiene la denominación de desecho especial.

3.1.3. DETERMINACIÓN DEL d_{80}

En el reciente estudio, se obtuvo la curva que describe la granulometría de la ceniza con el objetivo de determinar el d_{80} y fundamentar su uso como reemplazo en parte del agregado fino en la elaboración de hormigón cumpliendo el requisito de tener un tamaño de partícula menor a 5 mm.

A partir de los resultados obtenidos de la tabla Al.1 del Anexo I se construyó la curva granulométrica de la ceniza utilizando el valor en porcentaje que pasa de la muestra respecto de la abertura del tamiz, como resultado se obtuvo la Figura 3.2. Se puede observar una variabilidad de la curva en las aberturas (850, 425 y 106

mm), esto es producido por un exceso de las fracciones finas en la distribución de tamaños provocando un aumento en el porcentaje del material que pasa en dichas aberturas.

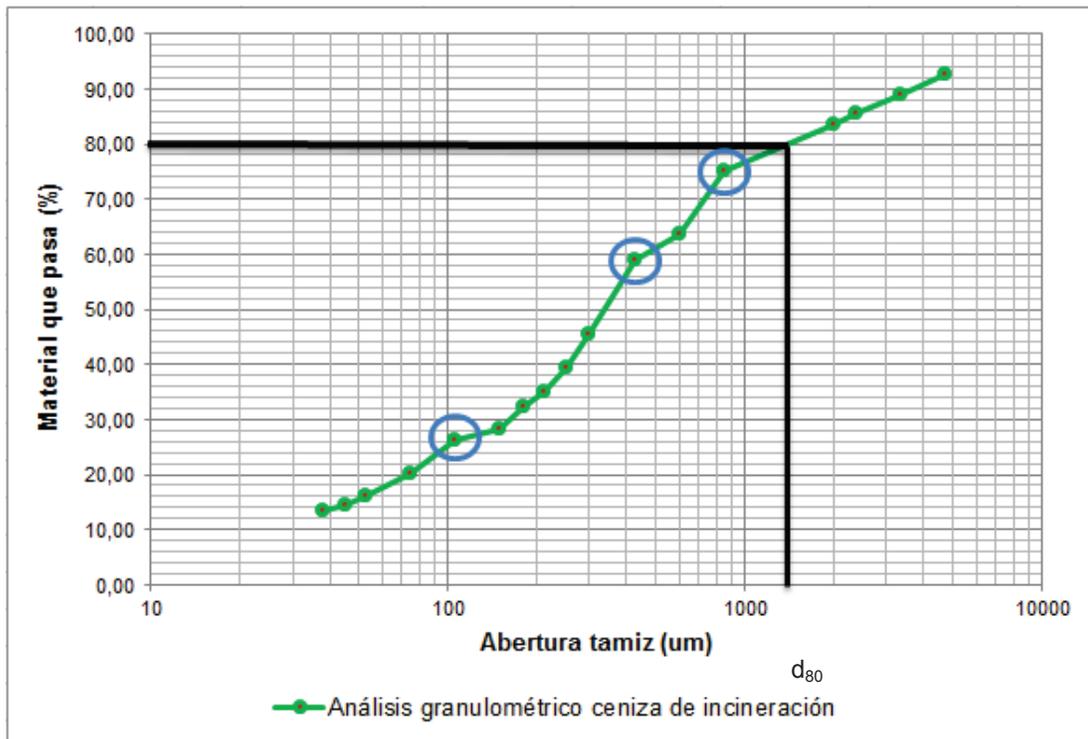


Figura 3.2. Curva granulométrica de la ceniza

De la Figura 3.2 se obtuvo el tamaño máximo de las partículas que constituyen la fracción más fina (d_{80}) de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUPS S.A correspondiente a 1,52 mm, valor que resulta de la interpolación entre 83,5% – 75,0% de material que pasa y 2000 – 850 mm de abertura de tamiz respectivamente.

Rivera. (2011), señala que el tamaño de partícula recomendado del material fino para uso en mezclas de hormigón debe ser entre (0,074 – 4,760) mm (p. 55). Por lo tanto, el valor de d_{80} obtenido para la ceniza cumple con el tamaño de partícula recomendado para uso en mezclas de hormigón.

El análisis se realizó usando la metodología de la sección 2.1.4, y en el Anexo I se encuentran detalladas las determinaciones de cada una de las pruebas.

3.1.4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL, APARENTE Y PORCENTAJE DE VACÍOS DE LA CENIZA

La determinación de la densidad real, aparente y volumen de poros presente en la ceniza se la realizó siguiendo la metodología descrita en la Sección 2.1.5 bajo las normas NTE INEN 856 y 858 respectivamente. Los resultados obtenidos de estas tres propiedades físicas se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultado de las propiedades físicas de las cenizas (densidad real, densidad aparente y porcentaje de vacíos)

Propiedades físicas	Valor
Densidad real (g/cm^3)	2,30
Masa unitaria (densidad aparente) (g/cm^3)	0,93
Porcentaje de vacíos (%)	87,61

Los resultados obtenidos demuestran que el valor de densidad real de la ceniza fue de $2,30 \text{ g/cm}^3$, este valor está dado principalmente por las fases cristalinas de aluminosilicatos presentes en la ceniza, cuya composición se presentó en la Tabla 3.1.

El valor de masa unitaria (densidad aparente) de la ceniza fue de $0,93 \text{ g/cm}^3$, mientras que, la del agregado fino fue de $1,84 \text{ g/cm}^3$, la diferencia entre estos valores radica en la influencia del porcentaje de vacíos (porosidad) presente en la ceniza, dado que a mayor porosidad el valor de la densidad aparente es menor, en el caso de la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A., fue de 87,61%, valor que se estableció una vez determinada la densidad (real y aparente) por medio de la Ecuación 2.1.

3.1.5. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

La humedad presente en la ceniza se determinó mediante el procedimiento descrito en la Sección 2.1.6 bajo la norma NTE INEN 862. Los resultados de tres réplicas presentadas en la Tabla 3.4 establecieron que la humedad presente en la ceniza proveniente del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A fue de 17,16%.

Tabla 3.4. Resultados de la cantidad de humedad presente en la ceniza

Muestra de ceniza	Humedad (%)	Humedad media (%)
1	18,23	17,16
2	17,41	
3	15,84	

El resultado obtenido está relacionado con la naturaleza del lugar de almacenamiento de la ceniza, el cual se encuentra expuesto al clima del ambiente de la región amazónica del Ecuador, provocando reacciones de hidratación en la ceniza y su posterior contenido de humedad en su lugar temporal antes de su disposición final. Otro factor significativo en los resultados de humedad es la característica porosa que posee la ceniza (87,61 %), aumentando la capacidad de absorción de agua de la misma.

Dentro del proceso de secado existe un período inicial en el cual la capa líquida que recubre al sólido se calienta progresivamente hasta alcanzar el equilibrio del sistema, por lo tanto, la velocidad de secado es mayor (McCabe, Smith y Harriot, 2007, p.841).

Consecuencia de esto se puede explicar la variación en el valor de humedad de la muestra número 3 presentado en la Tabla 3.4 (15,84 %), la cual pudo presentar un menor recubrimiento de agua en su superficie provocando una mayor velocidad de secado.

3.2. DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y HORMIGÓN CON CENIZA

El procedimiento que se efectuó para la dosificación del hormigón convencional para una resistencia de 210 kg/cm^2 , se lo describe en la Sección 2.2.1 bajo la norma ACI 211.1.

En la Tabla 3.5 se presenta información correspondiente a las propiedades físicas de las materias primas utilizadas en el método antes mencionado y su soporte documental se encuentra detallado en el Anexo IV.

Tabla 3.5. Propiedades físicas de los agregados fino y grueso y del cemento

Componente	Información requerida	Valor
Agregado Fino	Densidad real (g/cm^3)	2,31
	Masa unitaria suelta (densidad aparente) (g/cm^3)	1,67
	Masa unitaria compactada (densidad aparente) (g/cm^3)	1,84
	Absorción (%)	12,79
	Granulometría d_{80} (mm);módulo de finura (MF)	2,40; 3,00
Agregado grueso	Densidad real (g/cm^3)	2,54
	Masa unitaria suelta (densidad aparente) (g/cm^3)	1,41
	Masa unitaria compactada (densidad aparente) (g/cm^3)	1,49
	Absorción (%)	4,43
	Tamaño máximo (pulg)	1,00
Cemento	Densidad real (g/cm^3)	2,84
	Masa unitaria suelta (densidad aparente) (g/cm^3)	1,05
	Masa unitaria compactada (densidad aparente) (g/cm^3)	1,32

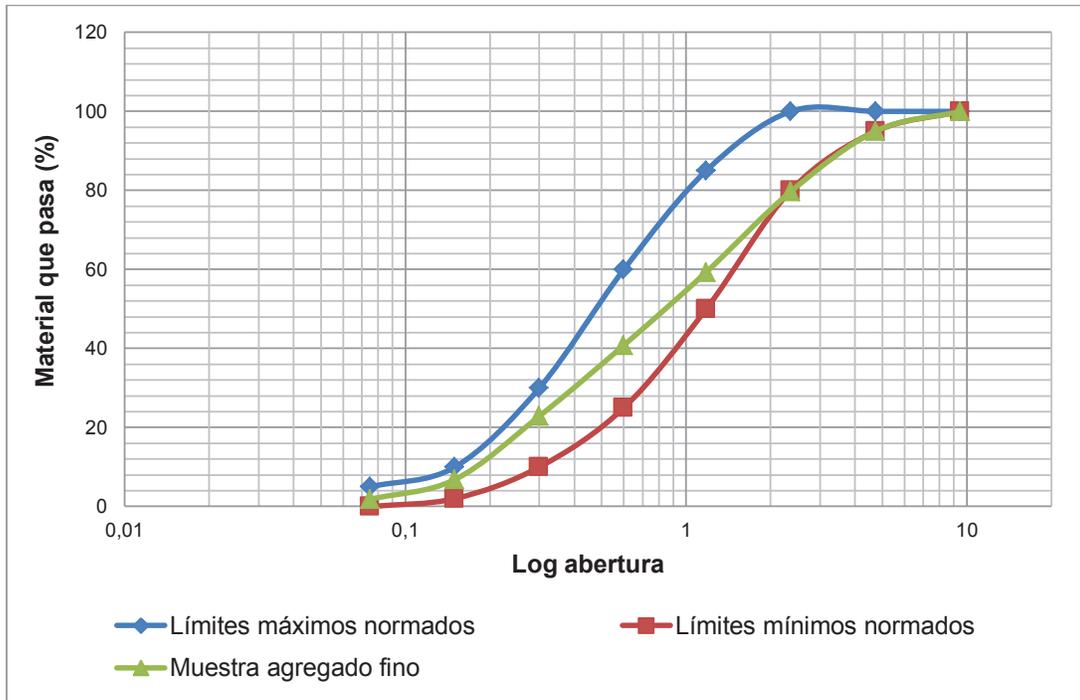


Figura 3.3. Curva granulométrica del agregado fino

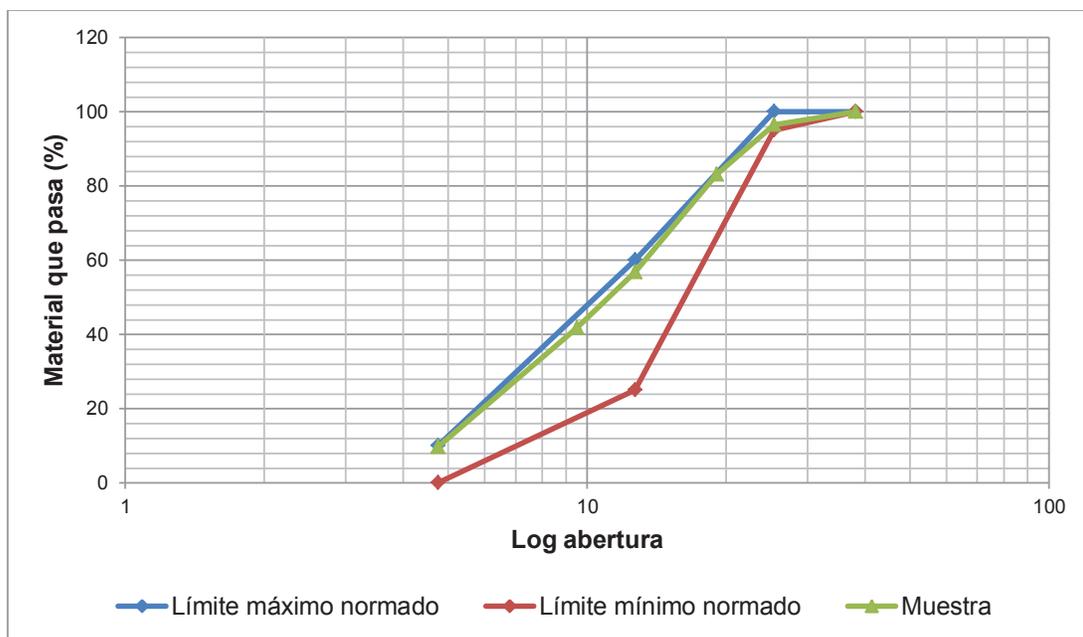


Figura 3.4. Curva granulométrica del agregado grueso

Como se mencionó en la Sección 1.2.1.1, la granulometría de los agregados es influyente en la proporción de los materiales para la dosificación de la mezcla de

hormigón y además, se debe verificar que cumplan con los requisitos de la norma NTE INEN 872 para su uso en el hormigón. En las Figuras 3.3 y 3.4 se presenta la curva granulométrica de los agregados fino y grueso respectivamente comparados con los límites máximos y mínimos normados, elaboradas a partir de los datos de las Tablas AIV.3 y AIV.6 del Anexo IV obtenidos experimentalmente.

Tanto el agregado fino como el grueso cumplen con los requerimientos exigidos por la norma, por lo tanto, son aptos para el uso en el cálculo de la dosificación de la mezcla de hormigón convencional.

En la Tabla 3.6 se expone la dosificación definitiva para elaborar 1 m³ de hormigón convencional de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, a partir del desarrollo de cada uno de los requisitos expuestos en el procedimiento de la Sección 2.2.1. Además, se debe aclarar que en el diseño de la dosificación de la mezcla de hormigón es sin inclusión de aire, razón por la cual el valor de la cantidad de aire en la Tabla 3.6 es igual a cero.

Tabla 3.6. Dosificación de 1 m³ de hormigón convencional $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Componentes	Peso (kg)
Agua	193,0
Cemento	309,8
Agregado Fino	723,8
Agregado Grueso	951,0
Aire	0,0
Relación en peso de los componentes	0,62 : 1,00 : 2,34 : 3,07

Se elabora hormigón con inclusión de aire cuando éste se expone en ambientes de congelación y deshielo. El aire incluido protege al concreto mediante pequeñas burbujas en la mezcla que funcionan como válvulas de presión cuando ocurre la congelación. Durante este fenómeno, el agua se expande aumentando su volumen en un 9 % aproximadamente provocando una presión hidráulica que da inicio a fisuras en el hormigón. Por lo tanto, si no existieran las burbujas de aire

fácilmente el concreto se romperá. Por otra parte, la evaporación del agua seguida de la cristalización de sales en el deshielo causa también un fenómeno semejante. Por lo tanto, al aplicarse esta dosificación en un ambiente cálido donde se encuentra el Centro de Tratamiento Integral de la empresa GPOWERGROUP S.A no es necesario un hormigón con inclusión de aire (IMECYC, 2007, p.10)

De acuerdo a lo expuesto por Rivera (2011), el tamaño de partícula de la ceniza (1,52 mm) y del agregado fino (2,40 mm) caracterizados es menor a 5,00 mm, cumpliendo con el tamaño requerido para un agregado de este tipo en la elaboración de hormigón. Además, esta característica física de la ceniza permite que se la use como reemplazo del agregado fino en la mezcla, con la necesidad de encontrar una dosificación que no altere de manera considerable las propiedades mecánicas del hormigón, al contrario se espera que exista un mejor progreso en éstas (p.53).

En las Tablas 3.7 y 3.8 se presentan las cantidades y relación en peso de cada uno de los componentes que conforman las mezclas de hormigón con ceniza.

Tabla 3.7. Dosificación de 1 m³ de hormigón con varios porcentajes de ceniza

Elementos	Ceniza (%)			
	15	20	25	30
	Peso (kg)			
Agua	193,0	193,0	193,0	193,0
Cemento	309,8	309,8	309,8	309,8
Agregado Fino	615,3	579,0	543,7	506,7
Agregado Grueso	951,0	951,0	951,0	951,0
Aire	0,0	0,0	0,0	0,0
Ceniza	108,5	144,7	180,1	217,1

Tabla 3.8. Relación en peso para cada una de las dosificaciones del hormigón con ceniza

Tipo de hormigón	Relación en peso
	agua : cemento : fino : grueso : ceniza
15% de ceniza	0,62 : 1,00 : 1,98 : 3,07 : 0,36
20% de ceniza	0,62 : 1,00 : 1,86 : 3,07 : 0,48
25% de ceniza	0,62 : 1,00 : 1,75 : 3,07 : 0,59
30% de ceniza	0,62 : 1,00 : 1,63 : 3,07 : 0,71

A partir de la mezcla patrón de hormigón convencional se obtuvieron las dosificaciones para elaborar hormigón con porcentajes de ceniza de 15 %, 20 %, 25 % y 30 % respectivamente; la determinación de cada una de las dosificaciones se detalla en el Anexo AIV.

3.3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULACIÓN CON HORMIGÓN

3.3.1. RESULTADOS DE ENSAYOS EN HORMIGÓN FRESCO

3.3.1.1. Asentamiento del hormigón

Las Tablas 3.9 y 3.10 muestran la clasificación de la consistencia según el asentamiento y los valores de asentamiento (fluidez) obtenidos del promedio de tres réplicas para el hormigón convencional y con porcentaje de ceniza, estos últimos se presentan en la Tabla AVI.1 del Anexo VI.

La disminución del valor del asentamiento se puede atribuir a las siguientes razones: en primer lugar, la combinación entre el tamaño de partícula y la forma de los agregados es más fuerte debido a que existió mayor fricción entre ellos provocando la disminución de las características del flujo de la pasta de hormigón.

Además, la cantidad de agua libre para el efecto de lubricación entre los agregados disminuyó debido a que parte de ésta pudo ser absorbida por los poros de las partículas de la ceniza (Rivera, 2011, pp.86-87).

Tabla 3.9. Resultado de asentamiento para el hormigón convencional y hormigón con ceniza

Tipo de hormigón	Asentamiento (cm)
Convencional	8,4
15 % de ceniza	7,8
20 % de ceniza	7,6
25 % de ceniza	7,3
30 % de ceniza	6,5

Por otra parte, las variaciones en los valores de asentamiento para cada tasa de sustitución con ceniza se mantuvieron en el rango especificado de asentamiento que se utilizó para el diseño de la dosificación según la Tabla AII.3 del Anexo II, a excepción del caso en que se realizó el reemplazo con 30 % de ceniza, el cual fue menor respecto del valor mínimo utilizado, esto ocurrió por la característica porosa de la ceniza, por lo tanto, a mayor cantidad de ésta, menor fue el asentamiento como se muestra también en la Figura 3.5.

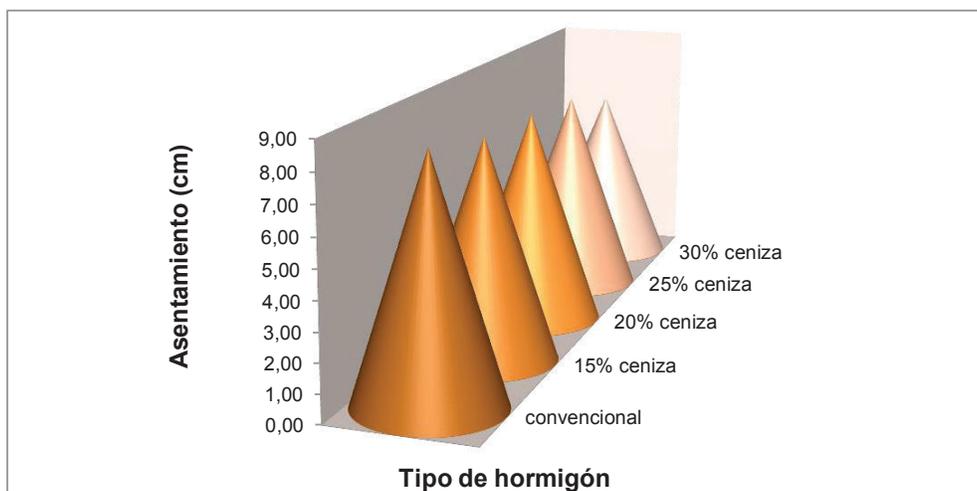
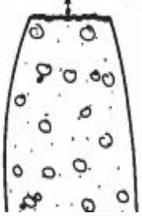
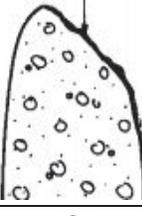
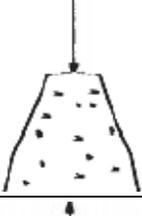
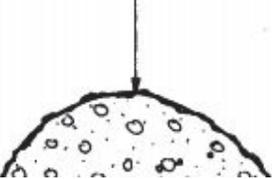


Figura 3.5. Asentamiento de acuerdo al tipo de hormigón

Revisando los valores de la Tabla 3.10 y al compararlos con los resultados obtenidos de asentamiento de la Tabla 3.9 se observa que todas las mezclas elaboradas son de característica plástica, al mismo tiempo que, los hormigones que poseen un asentamiento bajo presentan problemas de mezclado y problemas de compactación dentro de los moldes, lo que puede provocar una disminución de la resistencia.

Tabla 3.10. Clasificación de la consistencia según los asentamientos medidos con el cono de Abrams

Consistencia	Asentamiento (cm)	Aspecto	Método de compactación
Seca	1,0 – 4,5		Vibración potente, apisonado energético en capas delgadas
Plástica	5,0 – 9,5		Vibración normal, varillado y apisonado
Blanda	10,0 – 15,0		Vibración leve, varillado
fluidificada	15,5 – 22,0		Vibración cuidadosa, varillado

(INECYC, 2007, p.48)

3.3.1.2. Temperatura del hormigón

La temperatura del hormigón en fresco es un parámetro que afecta directamente en las siguientes características: variación en la velocidad de pérdida de fluidez y en una alteración de la hidratación del cemento, lo que conduce a un aceleramiento o retraso en el fraguado, y a su vez cambios en la resistencia final del hormigón.

En la Tabla 3.11 se presentan los valores promedio medidos de tres lecturas de la temperatura del hormigón convencional y del hormigón con ceniza en estado fresco, siguiendo la metodología descrita en la Sección 2.2.2.1. Los valores promedio se presentan en la Tabla AVI.2 del Anexo VI.

Tabla 3.11. Temperatura de hormigón convencional y hormigón con ceniza

Tipo de hormigón	Temperatura (° C)
Convencional	19,6
15 % de ceniza	15,3
20 % de ceniza	17,0
25 % de ceniza	16,5
30 % de ceniza	16,9

Como se puede observar los valores de temperatura son valores bajos propios de trabajar en un clima frío como el de la ciudad de Quito. Además, durante la elaboración de los moldes para los ensayos en estado endurecido se observó afectación en el fraguado del hormigón con ceniza respecto del hormigón convencional, ya que por la hidratación del cemento fue más lenta provocando un retardo del mismo.

Consecuentemente la temperatura bajo la cual se lleva a cabo el proceso de elaboración de hormigón es un factor de influencia en el desarrollo de las propiedades (tiempo de fraguado, fluidez y resistencia) del mismo mediante la aceleración o retraso del proceso de endurecimiento. Por lo tanto, se debe evitar trabajar con temperaturas ambiente inferiores a los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y superiores a los

30°C en la elaboración de hormigón. El primer caso es para impedir que los procesos químicos del cemento se detengan, mientras que, el segundo caso afectaría de manera directa la hidratación de la reacción química del cemento con el agua (Ortiz, 2005, p.16; ICPA, 2011, p.13).

3.3.1.3. Contenido de aire

Los valores presentados en la Tabla 3.12 corresponden al promedio de tres mediciones del contenido de aire cuyos resultados se encuentran en el Anexo VI, Tabla AVI.3 tanto en el hormigón convencional como el hormigón con varios porcentajes de sustitución de ceniza.

Tabla 3.12. Contenido de aire en hormigón convencional y hormigón con ceniza

Tipo de hormigón	Contenido de aire (%)
Convencional	1,5
15 % de ceniza	1,6
20 % de ceniza	1,7
25 % de ceniza	1,8
30 % de ceniza	1,8

Si bien el hormigón que se elaboró fue sin inclusión de aire, para el diseño y cálculo de la dosificación se tomó como referencia un contenido de aire teórico correspondiente a 1,5 % de la Tabla AII.3 del Anexo II, de acuerdo a la metodología descrita en la Sección 2.2.1.

El valor determinado de contenido de aire del hormigón convencional elaborado es igual al valor teórico para el diseño de la dosificación inicial indicado anteriormente, lo cual demuestra que, a pesar de diseñar una mezcla de hormigón sin inclusión de aire, es inevitable que no quede aire atrapado al momento de mezclar los componentes.

De igual manera, el contenido de aire del hormigón con ceniza se incrementó de la misma forma que se incrementó el porcentaje de sustitución de ceniza por agregado fino, esto es consecuencia del alto porcentaje de vacíos que tiene la ceniza que alcanza un 87,61 % como se indica en la Sección 3.1.4, provocando que se atrape más aire en los poros de ésta.

3.3.2. RESULTADOS DE ENSAYOS EN HORMIGÓN ENDURECIDO

Llevado a cabo las etapas de preparación, encofrado, fundición y curado de los especímenes (probetas cilíndricas y viguetas), se procedió a realizar los ensayos físicos para la determinación de cada una de las propiedades mecánicas del hormigón convencional y con ceniza bajo las normas establecidas en la Sección 1.2.2.1, Tabla 1.8.

Los procedimientos para la determinación de las propiedades mecánicas se describen en la Sección 2.2.2.2, y cada uno de los cálculos realizados para dichas determinaciones se presenta en el Anexo V. De igual manera el resumen de resultados de los valores promedio de cada propiedad analizada se encuentra en el Anexo VI.

3.3.2.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión ($f'c$) de las mezclas de hormigón convencional y con cenizas fue determinada a 3, 7, 14, 28 días de curado para obtener resistencias a la compresión de 210 kg/cm², como se muestra en la Tabla 3.13 junto a sus resultados. Los resultados obtenidos confirman que la resistencia a la compresión del hormigón aumenta con la edad de curado para todas las mezclas, pero también se cumple que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza, la capacidad resistente del hormigón disminuye respecto del hormigón convencional para las distintas edades de curado.

Tabla 3.13. Resultado ensayo de resistencia a la compresión del hormigón convencional y con ceniza a 3, 7, 14, 28 días de curado

Edad (días)	Resistencia a la compresión ($f'c = \text{kg/cm}^2$)				
	HC	C15	C20	C25	C30
3	75,28	91,60	81,26	77,77	71,66
7	132,47	138,23	125,64	106,78	100,75
14	190,36	186,08	169,60	119,33	111,52
28	208,37	202,79	182,61	144,36	137,62

HC: hormigón convencional

C30: hormigón con 30 % de ceniza

C25: hormigón con 25 % de ceniza

C20: hormigón con 20 % de ceniza

C15: hormigón con 15 % de ceniza

Por otra parte, las mezclas de hormigón elaboradas con 15 % y 20 % de ceniza en reemplazo del agregado fino, obtuvieron una mayor ganancia de resistencia a los 3 y 7 días comparadas con el resultado del hormigón convencional como se muestra en la Tabla 3.13. Sin embargo, luego de estas edades la resistencia del hormigón con 15 % y 20 % de ceniza, a partir del día 14 y 28 respectivamente, disminuye respecto al hormigón convencional, es decir, sigue aumentando en el tiempo de forma gradual, pero con valores menores al hormigón base.

Además, se puede evidenciar en los resultados de la Tabla 3.13 cómo las sustituciones con 25 % y 30 % de ceniza por agregado fino no son aceptables ni viables por cuanto genera una diferencia del 30 % y 34 % respecto de la resistencia del hormigón convencional a los 28 días de curado. Mientras que, se obtuvieron resistencias a la compresión entre 202,37 y 182,61 kg/cm^2 cuando se trabajó con 15 % y 20 % de ceniza como reemplazo del agregado fino representando una diferencia de 2,0 % y 12,2 % respectivamente respecto del hormigón patrón.

Esto último está directamente relacionado con la calidad, cantidad y reactividad de la adición, provocando un aumento en la demanda de agua, seguido de una disminución en la reacción puzolánica la cual retarda el avance en el desarrollo de los productos de hidratación (Valderrama, Torres y Mejía, 2011, p-42).

En la Figura 3.6 se representan las curvas de endurecimiento del hormigón convencional y sin ceniza, graficadas a partir del valor de la resistencia a la compresión respecto a los días de curado, en la cual se evidencia que, cuando se reemplazó el 15 % de ceniza por agregado fino en el hormigón, la curva de endurecimiento para esta mezcla tuvo una tendencia parecida a la del hormigón convencional, demostrando también que esta mezcla mantuvo un mejor comportamiento de resistencia a la compresión a diferencia de las demás mezclas de hormigón con ceniza.

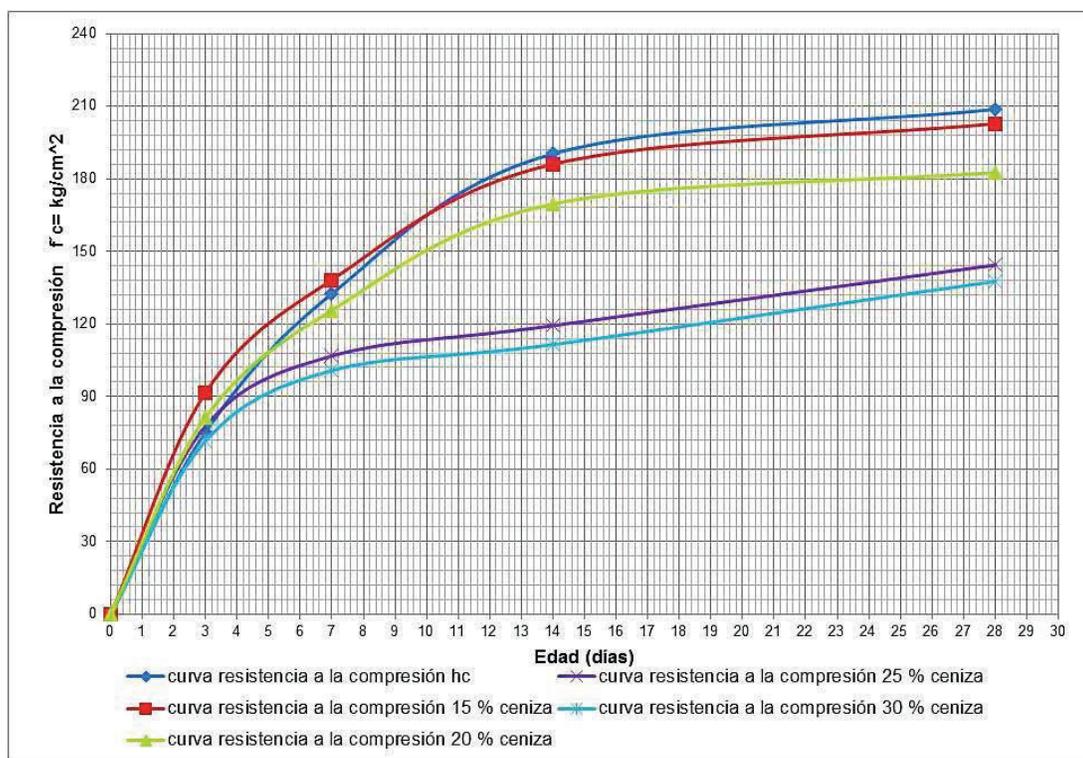


Figura 3.6. Curvas de endurecimiento para el hormigón convencional (hc) y el hormigón con ceniza (15 %, 20%, 25% y 30 %)

En la Tabla 3.14 se presentan los modelos de fracturas generados a partir del ensayo de resistencia a la compresión para cada una de las mezclas de hormigón y su comparación con la norma NTE INEN 1573, los cuales permiten entender la diferencia de resistencia entre probetas de iguales dimensiones, sin embargo, no permiten descartar valores obtenidos salvo que se produzca una falla de

compresión excéntrica (falla debido a un procedimiento de ensayo incorrecto) como se indica en la Figura 3.7 (INEN, 2010d, p.10; Gutiérrez et al, 2002, p.2)

Tabla 3.14. Esquema de los modelos típicos de fractura para el hormigón convencional y con 15%, 20%, 25% y 30% de ceniza

Modelo de fractura bajo norma NTE INEN 1573			
Tipo 3	Tipo 6	Tipo 4	Tipo 2
			
Tipo de hormigón			
HC	C15	C20	C25 y C30
			

(Norma INEN 1573, 2010d, p.10)



Figura 3.7. Representación de una falla por compresión excéntrica (Lee et al, 2010)

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión con 15 % de reemplazo de ceniza por agregado fino demostraron que este tipo de hormigón elaborado cumple con el requisito de resistencia mínima (200 kg/cm^2) para la elaboración de adoquines de uso peatonal según lo expuesto en la Tabla 1.6 correspondiente a la Sección 1.2.1.2.

3.3.2.2. Módulo de elasticidad

En la Tabla 3.15 se observa los valores del módulo de elasticidad (E_c) del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado obtenidos de la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria.

Tabla 3.15. Resultados del módulo de elasticidad del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado, comparación con norma ACI 318S-08

Tipo de hormigón	Módulo de Elasticidad (GPa)	
	Calculado	Criterio ACI 318-08 ($E_c = 4700 * \sqrt{f'c}$)
Convencional	24,51	21,54
15 % de ceniza	33,94	21,16
20 % de ceniza	23,34	20,08
25 % de ceniza	19,61	17,85
30 % de ceniza	18,85	17,43

De la Tabla 3.15 se puede evidenciar como va aumentando el valor del módulo de elasticidad al disminuir la cantidad de sustitución de ceniza por agregado fino en la dosificación de la mezcla, pero con el valor de 15 % de ceniza como reemplazo, el valor del módulo de elasticidad supera el valor del hormigón convencional en un 38,47 %. Es probable que la disminución del módulo se deba a que la ceniza se hidrata rápidamente a tempranas edades y luego se inhibe, dejando un centro no hidratado que se refleja en la disminución de la resistencia. Este centro no hidratado, no aporta a la ganancia de resistencia convirtiéndose en material de relleno inerte, con lo cual el hormigón se comporta más frágil como se observa en la Figura 3.8.

A partir de los resultados experimentales mostrados en las Tablas AVI.9, AVI.10, AVI.11, AVI.12 y AVI.13 del anexo VI, se obtuvieron las curvas de esfuerzo - deformación de las mezclas de hormigón convencional y con 15 %, 20 %, 25 %, 30 % de ceniza representadas en las Figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 respectivamente. Los hormigones que presentan resistencias bajas como es el caso de las mezclas con 20 %, 25 %, y 30 % de ceniza suelen mostrar una mayor capacidad de deformación y consecuentemente un menor valor en el módulo de elasticidad respecto de la mezcla de hormigón convencional (Romo, 2006, pp.16-20).

La determinación del módulo de elasticidad cuando se trata de materiales elásticos es considerado constante, independiente del esfuerzo que se pueda aplicar siguiendo la ley de Hooke; para el caso particular del hormigón, el módulo de elasticidad se encuentra afectado por las microfisuras que aparecen en la interfase pasta-árido al aplicar una carga en este y que provocan la no linealidad de la curva al comportarse como un pseudo-sólido, salvo en el tramo inicial que si existe linealidad.

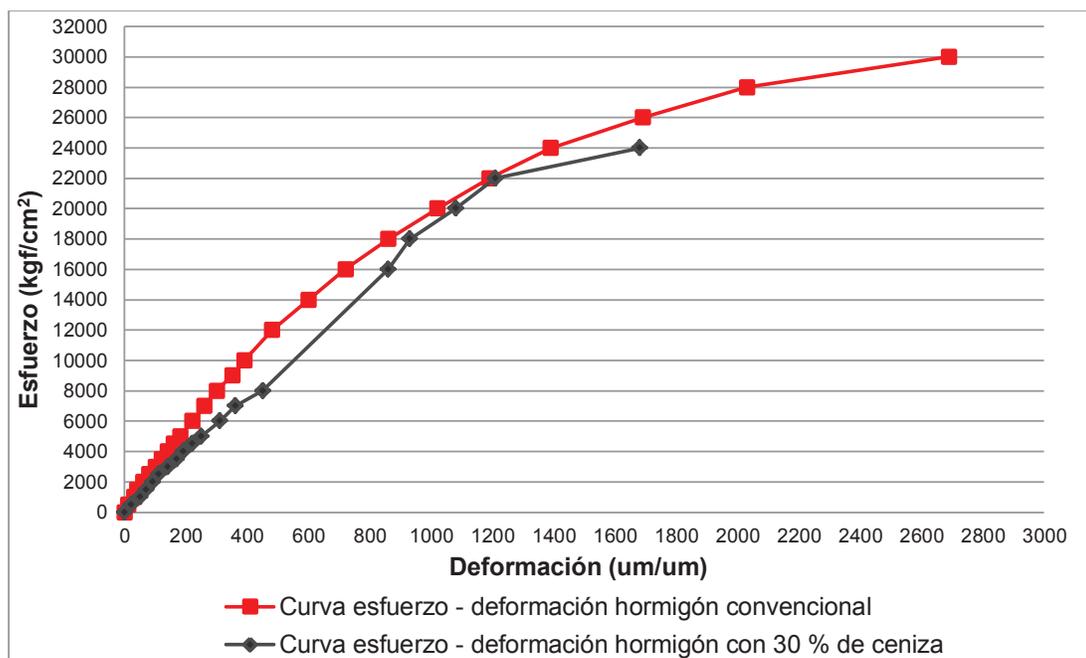


Figura 3.8. Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 30 % de ceniza

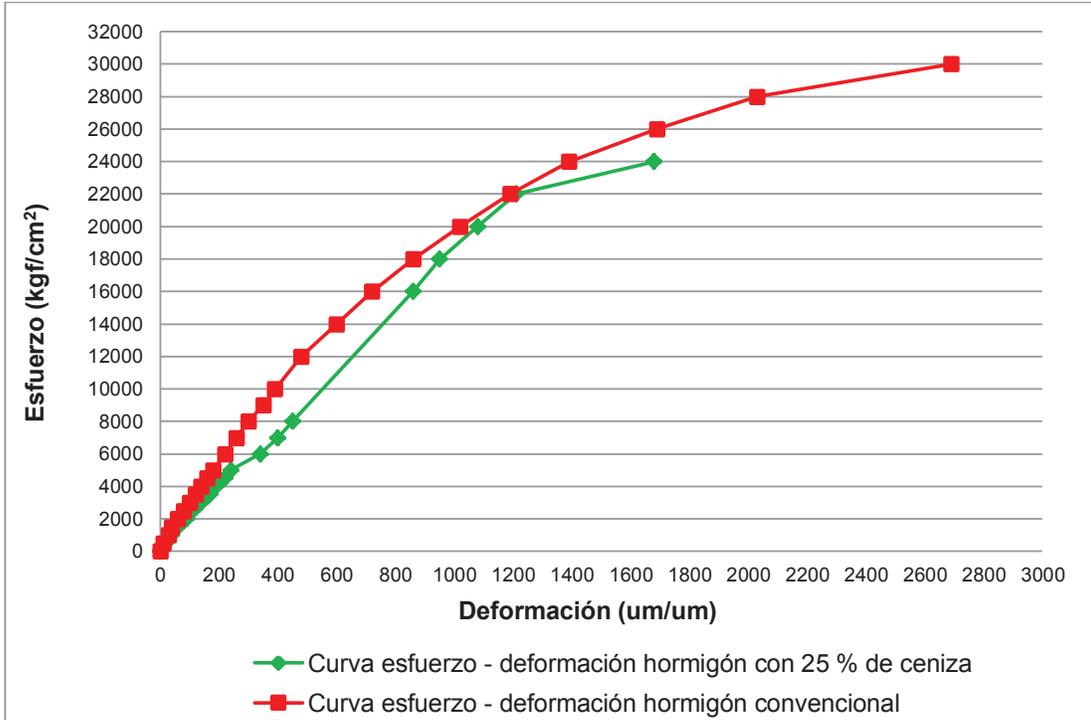


Figura 3.9. Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 25 % de ceniza

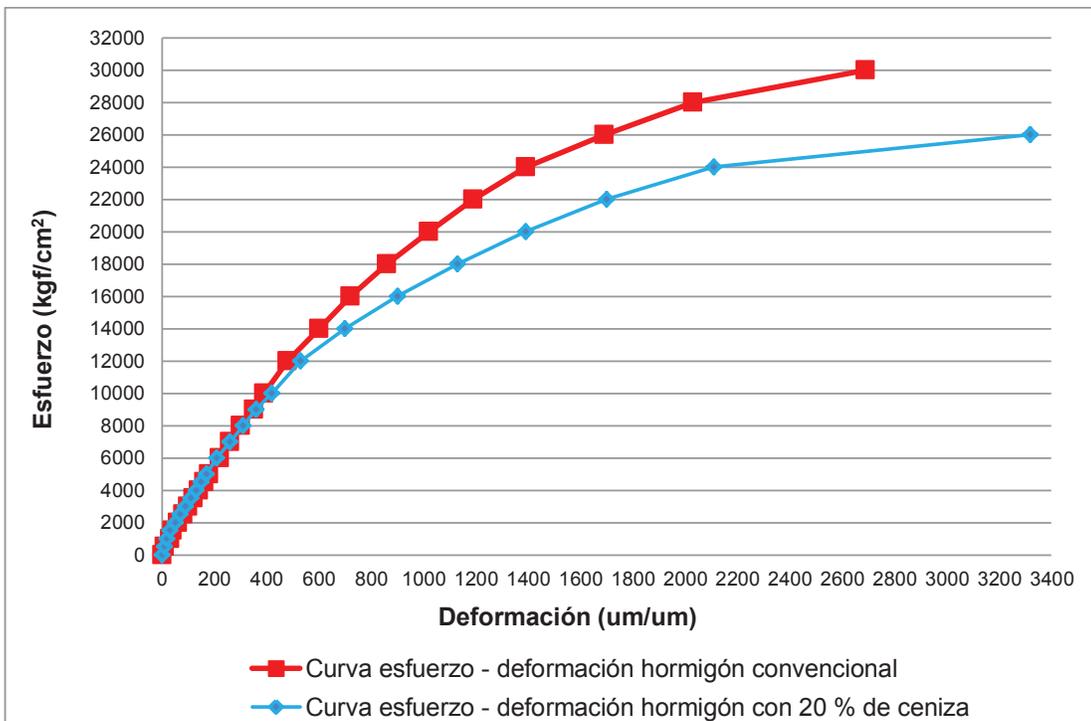


Figura 3.10. Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 20 % de ceniza

En las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se observa que el rango de comportamiento lineal para las mezclas de hormigón con 20 %, 25 %, y 30 % de ceniza tiende a desviarse más hacia el eje de la deformación, indicando que el hormigón se comporta de forma más dúctil con la inclusión de ceniza, mientras que, el hormigón elaborado con 15 % de ceniza Figura 3.10 presenta un rango de linealidad mayor (menor capacidad de deformación), comparado con el hormigón base.

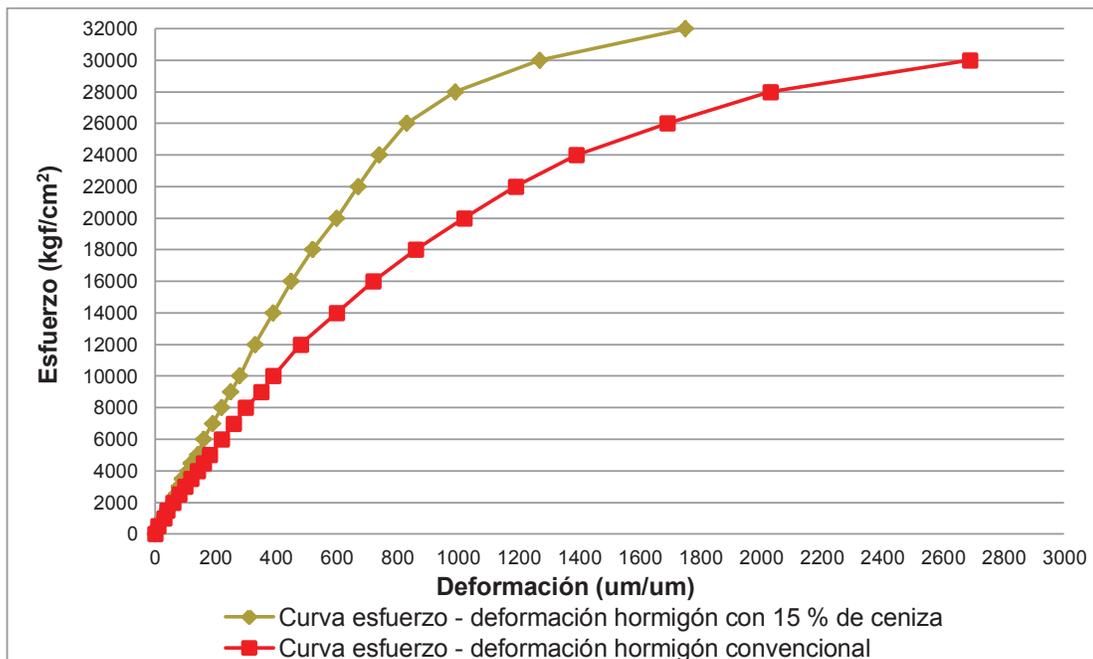


Figura 3.11. Esfuerzo – deformación hormigón convencional vs hormigón con 15 % de ceniza

Se ha realizado una comparación con la norma ACI 318S-08 para el cálculo del módulo de elasticidad, los resultados obtenidos bajo norma son menores y permiten determinar una confiabilidad de los datos obtenidos en el ensayo realizado. (ACI, 2008, p.113)

3.3.2.3. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del hormigón y se la expresa con el Módulo Rotura (MR), en la Tabla 3.16 se

presentan los valores de módulo de rotura del hormigón convencional y con ceniza, a 28 días de curado.

Para NRMCA (2008), el módulo de ruptura oscila entre el 10 % y 20 % de la resistencia a la compresión, teniendo en cuenta su dependencia en cuanto al tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio con materiales dados y el diseño de la mezcla utilizado (p. 1).

Los resultados obtenidos de resistencia a la flexión generalmente se encuentran muy debajo de los valores de resistencia a la compresión, pero son superiores a los valores de resistencia a la tracción, esto se puede evidenciar comparando los resultados en la Sección 3.3.2.1 y la 3.3.2.4 respecto de los valores presentados en la Tabla 3.16.

A su vez todos los valores de relación entre el módulo de rotura respecto de la resistencia a la compresión se encuentran en el rango establecido anteriormente (10 % y 20 %), y son determinantes al momento de aplicar este tipo de hormigón para elaborar mampuestos o en su defecto vigas, elementos prefabricados o postes.

Tabla 3.16. Resultados del módulo de rotura del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado; relación MR/f'c

Tipo de hormigón	Módulo de rotura (kg/cm²)	Disminución del MR (%)	Relación MR/f'c (%)
Convencional	38,47	-	18,46
15 % de ceniza	33,16	13,80	16,35
20 % de ceniza	27,43	28,69	15,02
25 % de ceniza	25,80	32,93	17,87
30 % de ceniza	24,05	37,48	17,48

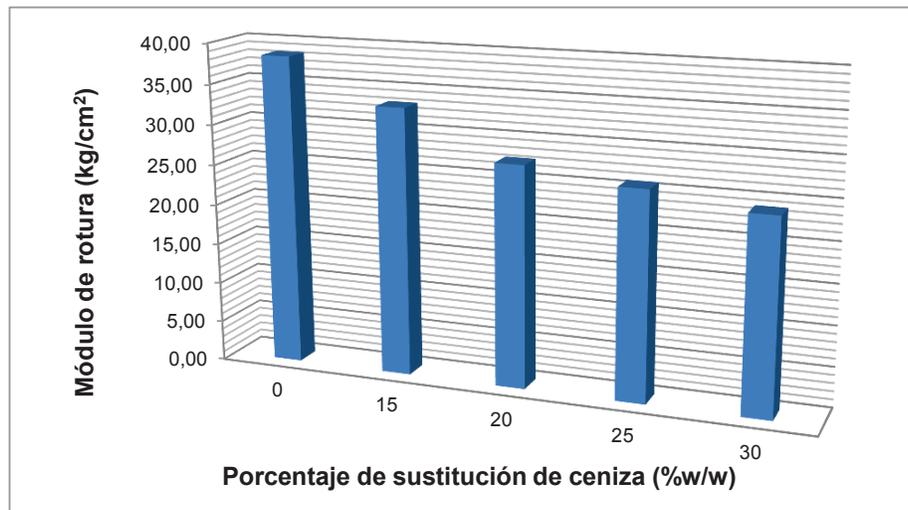


Figura 3.12. Efecto de la ceniza en la resistencia a la flexión

En la Figura 3.12 se observa el efecto de la concentración de ceniza en la resistencia a la flexión del hormigón convencional, la cual disminuye a medida que la tasa de reemplazo de la ceniza se incrementa, llegando a ser de 37,47 % y del 13,80 % menor con sustitución de ceniza del 30 % y 15 % respectivamente.

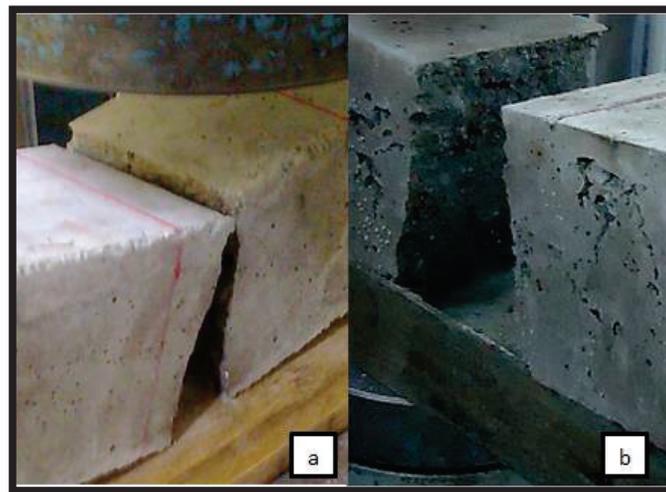


Figura 3.13. Superficie del hormigón después del ensayo de resistencia a la flexión

Un factor a considerar también, es la sección de la fractura producida al momento del ensayo, en la Figura 3.13 se observa que la superficie del hormigón con ceniza (b) es más plana respecto del hormigón base (a). Es decir, que las fisuras

se propagan con mayor facilidad a través de las partículas de las cenizas, mientras que, en el hormigón convencional existe un cambio en la dirección de propagación de las mismas. De esta manera se explica la reducción del módulo de rotura al aumentar el porcentaje de reemplazo de ceniza (Kim y Lee, 2011, p.7)

3.3.2.4. Resistencia por tracción indirecta

El estudio realizado por Silva et al (2014) expone a la resistencia por tracción indirecta ($f't$) como una de las propiedades fundamentales del hormigón y que se puede relacionar con la resistencia a la compresión (p. 91). De igual manera Gutiérrez (2003), establece que la variación en esta propiedad se encuentra entre 7 – 13 % del ($f'c$) (p.111).

Tabla 3.17. Resultados de resistencia a la tracción indirecta hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado; relación ($f't/f'c$)

Tipo de hormigón	Resistencia a la tracción (kg/cm ²)	Relación $f't / f'c$ (%)
Convencional	23,66	11
15 % de ceniza	18,25	9
20 % de ceniza	14,56	8
25 % de ceniza	13,96	10
30 % de ceniza	13,12	10

Los valores de resistencia a la tracción del hormigón convencional y con ceniza se presentan en la Tabla 3.17, a 28 días de curado, en ella se observa que a medida que aumenta la cantidad de sustitución de ceniza por agregado fino, es menor la resistencia por tracción indirecta, siguiendo la misma tendencia de la resistencia a la compresión.

Además, se observa que la relación entre la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la compresión se encuentran entre el rango citado de bibliografía, lo

cual comprueba el comportamiento del material y que los ensayos realizados se efectuaron de una manera adecuada.

Adicionalmente, se establece un análisis del tipo de fisuras presente en las probetas después del ensayo a tracción indirecta. En la Figura 3.14 se puede observar que las fisuras se inician en la parte central de la probeta (a), y se propaga hacia los apoyos en la dirección de aplicación de la carga (b). Una vez que la fisura central se ha extendido, aparecen fisuras secundarias las cuales crecen desde el borde hacia el interior de la probeta paralela a la fisura principal (c).

Además, en esta última se puede observar que existe rotura con formación de cuña, estos tipos de fisuras se consideran anómalas y se deben, en mucho, a que se incrementa el nivel de resistencia, la edad del hormigón, el contenido de aire o en su debido caso a agregados de menor resistencia provocando propagación a través de éstos.



Figura 3.14. Tipos de fisuras anómalas observado en el ensayo de tracción indirecta

3.3.2.5. Determinación del esfuerzo de adherencia

La Tabla 3.18 resume los valores promedio de tres mediciones para el ensayo de esfuerzo de adherencia del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado efectuando la metodología descrita en la Sección 2.2.2.2. El objetivo de este ensayo es determinar el esfuerzo de adherencia resultante de aplicar una carga opuesta al extremo de deslizamiento de la barra introducida al interior de la probeta respecto de la superficie de la misma.

Los resultados del ensayo de adherencia expuestos en la Tabla 3.18 indican que de las mezclas de hormigón con ceniza, la concentración que corresponde al 15% requiere de un esfuerzo de adherencia mayor respecto a los resultados obtenidos con las demás concentraciones, respondiendo de manera favorable con un valor cercano al del hormigón convencional.

Tabla 3.18. Resultados ensayo de adherencia del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado

Tipo de hormigón	Esfuerzo de adherencia (kg/cm²)
Convencional	37,14
15 % de ceniza	35,79
20 % de ceniza	32,13
25 % de ceniza	29,82
30 % de ceniza	29,51

El esfuerzo a la adherencia para este caso se encuentra asociado al movimiento que promueve la barra colocada dentro de la probeta, es decir, tener un deslizamiento menor asociado a una mayor fuerza de adherencia implica un anclaje de mejor calidad.

Otro factor a tener en cuenta en la afectación de los resultados es la elaboración de la dosificación respecto a la relación agua-cemento, en los hormigones con 30

% y 25 % de ceniza existe un mayor consumo de agua debido a la porosidad de la misma, por lo tanto, la mayor cantidad de vacíos o aire atrapado podría llevar a la presencia de una menor superficie de agarre.

El trabajo presentado por Ruiz et al. (2012), establece que la adherencia en el hormigón tiene un límite de 8,3 MPa según la norma ACI 318-08, mientras que, para un hormigón de 210 kg/cm² de resistencia y para barras menores a 32 mm de diámetro el Eurocódigo 2 indica valores de 2,3 MPa como mínimo (p. 12).

Si se compara los valores presentados en la Tabla 3.18 con los rangos citados, se evidencia que el hormigón convencional y con ceniza elaborado para este proyecto, cumple con la norma establecida al poseer una buena adherencia matriz-acero.

3.3.2.6. Velocidad sónica

En la Tabla 3.19 se presentan los valores promedio de mediciones de la velocidad sónica del hormigón convencional y del hormigón con concentración de ceniza en estado endurecido a 28 días de curado y su comparación con la bibliografía citada.

Tabla 3.19. Resultados ensayo velocidad sónica hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado comparados con bibliografía

Tipo de hormigón	Velocidad sónica (m/s)		Calidad del hormigón	
	Ensayado	Referencia	Ensayado	Referencia
Convencional	3 861	> 4 500	Bueno	Excelente
15 % de ceniza	3 619	3 600 – 4 500	Bueno	Bueno
20 % de ceniza	3 296	3 000 – 3 600	Aceptable	Aceptable
25 % de ceniza	3 066	2 100 – 3 000	Aceptable	Malo
30 % de ceniza	2 795	< 2 100	Malo	Muy malo

(Jiménez, García y Morán, 2001, p.122)

Los valores obtenidos del ensayo de pulso ultrasónico presentados en la Tabla 3.19 determinan que la calidad del hormigón convencional es buena con una velocidad de 3861 m/s, si se observa los resultados obtenidos de velocidad sónica para el hormigón con ceniza se evidencia que, la calidad que se acerca más a la del hormigón convencional es con 15 % de ceniza en sustitución de agregado fino (3 619 m/s), para porcentajes de 20 % y 25 % de ceniza es un hormigón aceptable con valores de velocidad sónica comprendidos entre 3 600 m/s – 4 500 m/s y para un 30 % de reemplazo de ceniza es malo (2 795 m/s) (Jiménez, García y Morán, 2001, p.122).

Estos resultados se deben fundamentalmente a que el valor de la velocidad sónica se ve afectada por (el contenido de aire; el tipo, cantidad y tamaño máximo del agregado), además del contenido de cavidades y la estructura de los poros del hormigón, demostrando así que al colocar mayor cantidad de una ceniza con altos porcentajes de vacíos (87,61 %) como lo es la utilizada en este proyecto existirá afectación en la porosidad del hormigón, por consiguiente a la propiedad ensayada y a la calidad del producto final (Ortega y Ripani, 2007, pp.3-4).

3.3.2.7. Determinación de peso específico y absorción

La Tabla 3.20 resume los valores promedio de tres mediciones para el ensayo de peso específico, absorción de agua y volumen de poros del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado.

En la Figura 3.15 se observa el desarrollo del peso específico del hormigón base y con ceniza, evidenciando una tendencia de disminución a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza por agregado fino respecto del hormigón sin esta. El valor del peso específico se redujo para cada una de las condiciones del ensayo: en seco de 2,295 g/cm³ a 2,216 g/cm³, saturado (S.S.S) de 2,308 g/cm³ a 2,266 g/cm³, después de inmersión y ebullición de 2,273 g/cm³ a 2,184 g/cm³, como se muestra en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Resultados de peso específico, absorción de agua y volumen de poros hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado

Tipo de hormigón	Peso específico en seco (g/cm ³)	Peso específico S.S.S (g/cm ³)	Peso específico después de inmersión y de ebullición (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Volumen de poros (%)
Convencional	2,295	2,308	2,273	0,822	1,895
15 % de ceniza	2,272	2,301	2,248	1,073	2,451
20 % de ceniza	2,268	2,281	2,241	1,206	2,732
25 % de ceniza	2,241	2,274	2,209	1,399	3,136
30 % de ceniza	2,216	2,266	2,184	1,455	3,211

Un factor del cual depende el peso específico del hormigón es la proporción de áridos que componen la mezcla ya que poseen distintas densidades, en el caso particular de este proyecto: agregado fino y grueso (2,31 g/cm³; 2,54 g/cm³). Para un hormigón con agregados de naturaleza determinada, el peso específico se ve afectado por la cantidad de poros en la matriz del cemento, es decir, el aire arrastrado y el aire atrapado en el hormigón.

El volumen de poros generado pudo ser producto de la relación agua - cemento en la dosificación del hormigón, debido a que cuanto mayor es esta relación se obtiene un hormigón más poroso.

Los valores de porcentaje de poros presentados en la Tabla 3.20 se incrementan a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de 1,89 % a 3,21 %, justificable por la porosidad que presenta la ceniza (87,16 %) provocando de igual manera que exista también un aumento en el porcentaje de absorción de agua de 0,82 % a 1,45 %.

Adicional a los valores presentados en la Tabla 3.20 se grafican los incrementos del porcentaje de volumen de poros y absorción de agua en la Figura 3.16.

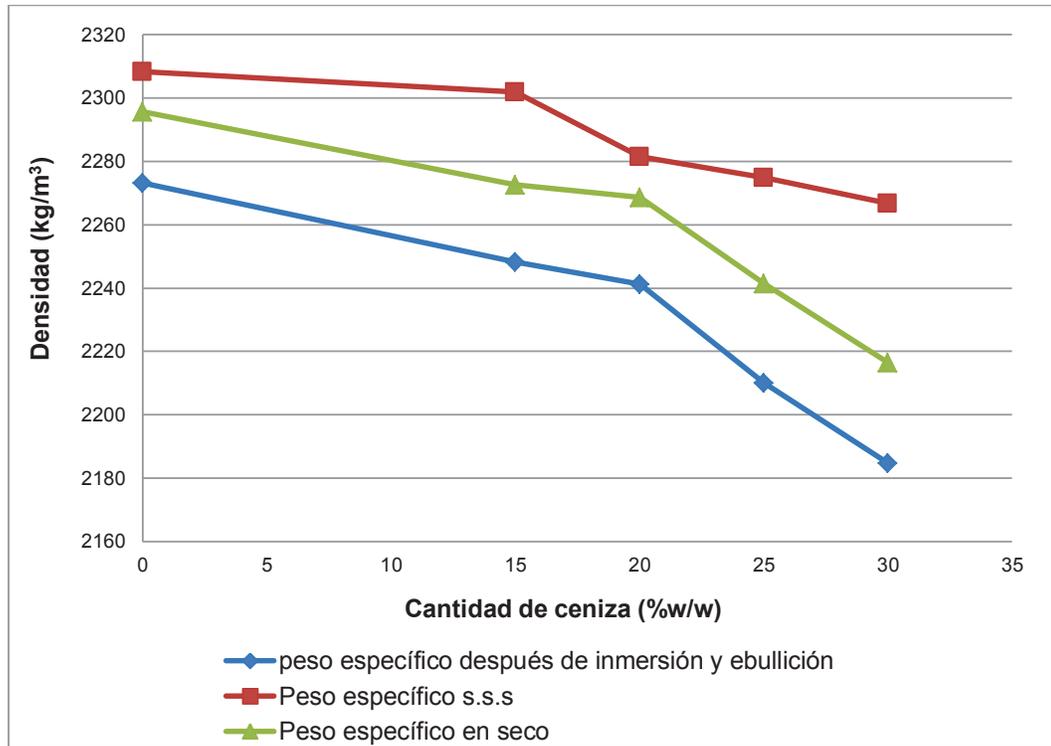


Figura 3.15. Influencia del porcentaje de ceniza en el peso específico

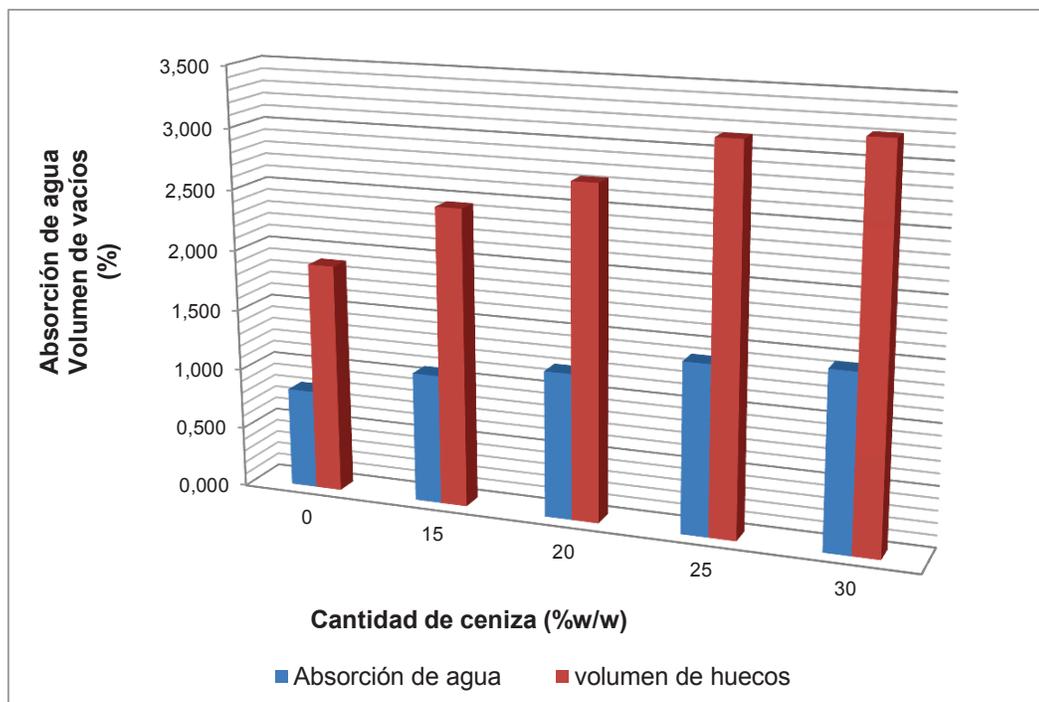


Figura 3.16. Influencia de porcentaje de ceniza en la absorción de agua y volumen de huecos

3.3.3. RESULTADOS DEL TEST TCLP DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN CON CENIZA PARA EL CONTROL AMBIENTAL

Los datos que se presentan en la Tabla 3.21 corresponden al test TCLP de las mezclas de hormigón con 20 %, 15 % (dosificación óptima), 10 % de ceniza y ceniza en estado libre. Cuando se habla de dosificación óptima, se usa como referencia a la propiedad mecánica más importante del hormigón que es la resistencia a la compresión, para la cual dicha mezcla desarrolló de manera favorable esta propiedad acercándose al valor del hormigón convencional. Por lo tanto, la mezcla con 20 % de ceniza representa un valor inferior y la mezcla con 10 % de ceniza la cual fue adicional y exclusiva para esta comparación representa un valor superior de resistencia a la compresión.

Tabla 3.21. Comparación del extracto lixiviado de la ceniza libre respecto del hormigón con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza

Elemento	Contenido de extracto lixiviado (mg/L)				² Límite máximo permisible (mg/L)
	Ceniza libre	Tipo de Hormigón			
		C10	C15	C20	
Arsénico	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	5,0
Bario	11,000	0,580	0,280	0,604	100,0
Cadmio	<0,020	<0,001	<0,001	<0,001	1,0
Cromo Total	<0,050 ¹	<0,078	0,0051	0,055	5,0
Mercurio	0,007	<0,001	<0,001	<0,001	0,2
Níquel	0,460	0,028	0,063	0,073	5,0
Plata	<0,010	<0,001	<0,001	<0,001	5,0
Plomo	0,230	<0,005	<0,005	<0,005	5,0
Selenio	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	1,0

¹Representa la concentración de cromo hexavalente de la ceniza en estado libre

²Resolución 002-SA-2014, 2014, pp. 70-71)

C10: hormigón con 10 % de ceniza

C15: hormigón con 15 % de ceniza

C10: hormigón con 10 % de ceniza

Como se observa en la Tabla 3.21, tanto para la ceniza en estado libre como el hormigón con porcentaje de 10 %, 15 % y 20 % de ceniza, los resultados del análisis TCLP demuestran que, las concentraciones de arsénico, cadmio, plata y selenio se encuentran por debajo del nivel mínimo de detección del equipo, es decir, concentraciones menores a (0,010 y 0,005 mg/L) para el arsénico, (0,020 y 0,001 mg/L) para el cadmio, (0,010 y 0,001 mg/L) para la plata y (0,010 mg/L) para el selenio.

Para la concentración de cromo se presenta de igual manera valores por debajo del nivel mínimo de detección para la ceniza en estado libre y con 10 % de ceniza en el hormigón.

Además, la concentración de cromo es superior en las mezclas de hormigón respecto de la ceniza en estado libre, debido a que esta última se reportó como cromo hexavalente y no total por el laboratorio que realizó el análisis, a diferencia del mercurio y plomo, cuyas concentraciones presentan valores por debajo del nivel mínimo (0,001 y 0,005 mg/L) respectivamente, en los hormigones con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza.

Sin embargo, para el bario y el níquel sí se pudo evidenciar con valores puntuales como disminuyeron las concentraciones en el extracto lixiviado después del proceso de estabilización con hormigón.

En la Figura 3.17, se observa como varió el porcentaje de encapsulación para estos dos metales, con una particularidad para el hormigón con 10 % de ceniza, del cual se esperaba un valor mayor que el reflejado en el hormigón con 15 % de ceniza para el bario.

La única razón para esta anomalía es una posible contaminación en la toma de muestra en el análisis de dicho hormigón con ceniza, con base en que existe un vacío teórico que explique una mayor concentración de bario de una muestra estabilizada con hormigón de menor contenido de ceniza.

Es necesario comentar que la Tabla 3.21 presenta diferentes niveles mínimos de detección para la concentración de metales tanto en la ceniza libre y luego del proceso de encapsulación, la razón de aquello radica en que el análisis TCLP para cada etapa fue realizado por los laboratorios CORPLABEC S.A y GRUENTEC respectivamente. No obstante, se puede observar que el efecto de la encapsulación de la mezcla de hormigón sobre la ceniza es efectivo y al igual que la ceniza en estado libre, cumple con la legislación ambiental descrita en la Sección 1.2.3.

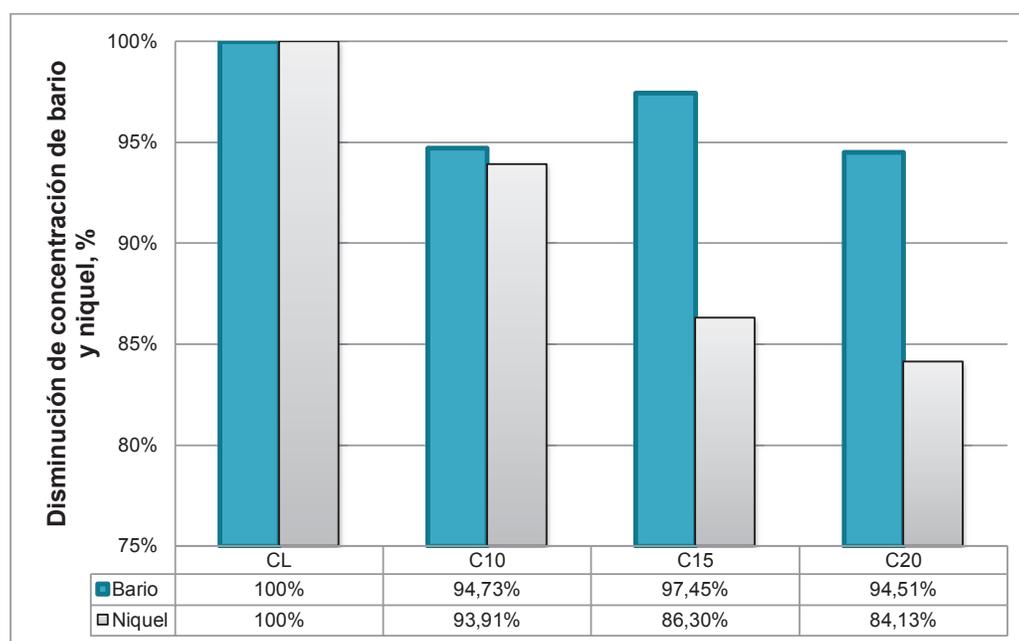


Figura 3.17. Disminución de la concentración de los metales bario y níquel después del proceso de encapsulación

Entre las consideraciones a tomar en cuenta para valorar los factores que pueden afectar el encapsulamiento y en consecuencia la lixiviación de los metales pesados se encuentra: la superficie específica que se forma en la base del silicato de calcio (C-S-H), ya que permite la absorción y la adsorción de los iones; y una alcalinidad elevada que ayuda a la precipitación de los hidróxidos insolubles, teniendo en cuenta que puede existir una disminución de la alcalinidad relacionado con la cantidad de cemento utilizado y del período de encapsulado como se reportó en el estudio de Rozumová et al. (2015), en la estabilización de

cenizas de fondo generadas en el proceso de incineración de residuos peligrosos (p. 3).

Para el caso particular de este proyecto todas las muestras de hormigón con ceniza para este análisis se tomaron a 28 días curado al igual que se realizó en la determinación de las propiedades mecánicas del hormigón en estado endurecido, por lo tanto, la precipitación de los metales como hidróxidos insolubles se debe principalmente al pH medido del extracto TCLP, el cual fue de 12,0 cuando se trabajó con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza.

3.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL MECANISMO DE ENCAPSULACIÓN DE CENIZA

La planta para el tratamiento de 170 kg/día ceniza proveniente del proceso de incineración en bruto de residuos industriales de la planta de GPOWERGROUP S.A se dimensionó para la elaboración de 900 unidades de adoquines de hormigón para uso peatonal diarios, conteniendo 15% de ésta. La capacidad se obtuvo de los registros de producción de ceniza reportados por la empresa GPOWERGROUP S.A quién auspicia este proyecto.

La producción mensual de ceniza hasta el mes de noviembre de los años 2013 y 2014 en la planta del Centro de Tratamiento Integral de la empresa GPOWERGROUP S.A se encuentra detallada en la Tabla 3.22. Se observa claramente cómo ha variado la producción de ceniza en los dos últimos años, y esto se debe a la planificación propia de la empresa al momento de realizar el proceso de incineración.

Para el mes de junio del año 2014 no hubo producción de ceniza debido a un problema en el incinerador, por lo cual se hizo el correspondiente mantenimiento, esta paralización, afectó a la producción promedio mensual comparada con el año

anterior. Consecuencia de esto se tomó como referencia para este proyecto la producción del año 2013.

Tabla 3.22. Producción de ceniza de la planta de GPOWERGROUP S.A correspondiente a los años 2013 y 2014

Mes	Cantidad (kg)	
	2013	2014
Enero	1 228,7	1 522,5
Febrero	1 183,0	9 167,2
Marzo	1 217,0	6 397,3
Abril	1 952,9	5 311,6
Mayo	11 892,3	6 613,6
Junio	10 726,8	1 591,8
Julio	9 697,8	0,0
Agosto	5 998,3	3 004,0
Septiembre	7 597,1	5 456,7
Octubre	3 773,0	706,3
Noviembre	935,2	5 272,4
Total	56 202,1	45 043,4
Promedio mes	5 109,3	4 094,8
Promedio día	170,3	136,5

GPOWERGROUP S.A.

3.4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA PLANTA PILOTO

La ubicación de la planta por fines económicos, transporte y de aplicación se implementará en el Centro de Tratamiento Integral (CTI) como se muestra en la Figura 3.18, ubicado en el km 6,5 de la vía Joya de los Sachas – Lago Agrio y representará un área correspondiente a 1 200 m² del total de la planta.



Figura 3.18. Imagen satelital del Centro de tratamiento integral de la empresa GPOWERGROUP S.A y el área destinada a la planta piloto para la fabricación de adoquines

3.4.2. BALANCE DE MASA

Se desarrolló el balance de masa general de la planta piloto y se representó cada una de las corrientes presentes en los equipos que forman parte del proceso de encapsulación para el tratamiento de la ceniza proveniente del proceso de incineración en bruto de residuos industriales de la planta de GPOWERGROUP S.A. Se tomó como base la elaboración de 3 397,78 kg/día de hormigón con 15 % de ceniza para la fabricación de 900 unidades de adoquines, para su elaboración se utilizó la Ecuación 2.17.

Un factor influyente en el proceso es la forma y a su vez las dimensiones de los mampuestos a fabricar, para una mejor aplicación en el Centro Integral de Tratamiento de la empresa GPOWERGROUP S.A, se ha definido que estos sean adoquines de uso peatonal tipo C, de acuerdo a las especificaciones de la norma

NTE INEN 1488 presentes en la Tabla 1.6. Esto no excluye otras formas de mampuestos como lo son bloques, ladrillos e inclusive realizar estructuras para cercas limítrofes.

Una vez seleccionado el tipo de adoquín a fabricar, se definieron las dimensiones del mismo: 200 mm de longitud, 100 mm de ancho y 80 mm de espesor; con lo cual se cumplen las consideraciones mencionadas en la Sección 1.3.2. Las corrientes de entrada y salida a cada una de las operaciones unitarias se muestran en las Figuras 3.18 y 3.19; así mismo, los resultados de los balances de masa de todo el proceso se resume en las Tablas 3.23 y 3.24.

Proceso de tamizado y molienda del agregado grueso:

Para la corriente número 2 (material grueso que cumple con el tamaño requerido) fue necesario calcular el d_{80} del material debido a que en el proceso de tamizado debe pasar un porcentaje del material correspondiente entre 5 – 12 mm lo cual ayuda a tener una mejor compactación de la mezcla al elaborar los adoquines. De esta manera, el cálculo del d_{80} representa el 80 % del material que pasa por el tamaño de partícula antes mencionado y el 20 % del material restante supera los 12 mm de tamaño de partícula, lo cual implica que debe pasar a un proceso de molienda y de esta manera reducir su tamaño de partícula. En la Figura 3.19 se observa que al proceso de tamizado entra 1 483,56 kg/día de agregado grueso (corriente 1) y de este valor, la cantidad de material que pasa a la etapa de molienda es 296,71 kg/día (corriente 3):

✓ Balance de masa tamizado- molienda:

$$1 = 2 + 3$$

Agregado grueso = agregado grueso (5 – 12mm) + agregado grueso (> 12mm)

$$1\,483,56 \frac{kg}{día} = 1\,483,56 \frac{kg}{día} * (0,80) + 3$$

$$3 = 296,71 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ de agregado grueso que sale de la molienda}$$

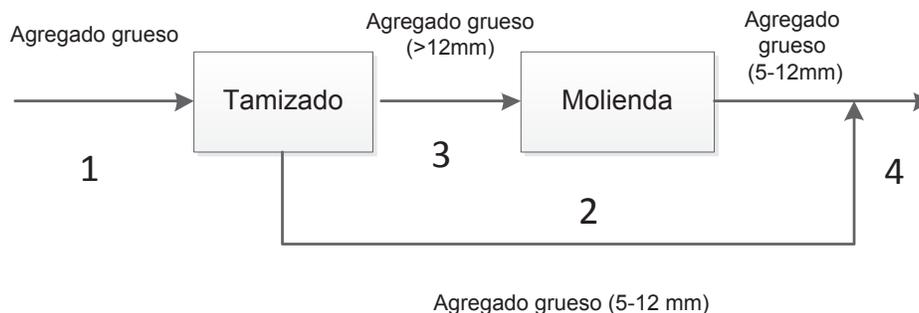


Figura 3.19. Diagrama de bloques de la entrada del agregado grueso al proceso de tamizado y molienda para su clasificación y reducción de tamaño

Tabla 3.23. Balance de masa por corrientes del proceso de elaboración de adoquines tipo C, desde la entrada al proceso de tamizado hasta la salida del proceso de molienda

Número de Corriente	1	2	3	4
Estado	Sólido	Sólido	Sólido	Sólido
Proceso	Tamizado	Tamizado	Tamizado - Molienda	Molienda
Flujo másico (kg/día)	1 483,56	1 186,85	296,71	296,71
Agregado fino (kg/día)	-	-	-	-
Agregado grueso (kg/día)	1 483,56	1 186,85	296,71	296,71
Cemento (kg/día)	-	-	-	-
Ceniza (kg/día)	-	-	-	-

Proceso de mezclado y vibrocompactación del hormigón:

En la Tabla 3.24 se observan las corrientes restantes del proceso para la elaboración de adoquines, en este diseño no existe ningún proceso con intercambio de calor, aclarando que el agua que se utiliza se encuentra a temperatura ambiente, de esta manera se descarta el balance de energía y se asume que todo el proceso se da a temperatura ambiente como se indica en el diagrama PDF de la Figura 3.20.

Tabla 3.24. Balance de masa por corrientes desde la entrada al proceso de mezclado hasta la entrada del proceso de vibrocompactación

Número de Corriente	5	6	7	8	9	10
Estado	Sólido	Sólido	Líquido	Sólido	Sólido	Sólido
Proceso	Mezclado	Mezclado	Mezclado	Mezclado	Mezclado	Vibrado
Flujo másico (kg/día)	1 483,56	959,86	301,08	483,28	170,00	3 397,78
Agua (kg/día)	-	-	301,08	-	-	-
Agregado fino (kg/día)	-	959,86	-	-	-	-
Agregado grueso (kg/día)	1 483,56	-	-	-	-	-
Ceniza (kg/día)	-	-	-	-	170,00	-
Cemento (kg/día)	-	-	-	483,28	-	-

Para la elaboración del hormigón las materias primas ingresan al proceso de mezclado como se muestra en la Figura 3.20 con las siguientes cantidades:

✓ **Balance de masa mezclado-vibrocompactación:**

$$10 = 5 + 6 + 7 + 8 + 9$$

Mezcla hormigón C15 = agregado grueso + agregado fino + agua + cemento + ceniza

$$10 = 1\,483,56 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 959,86 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 301,08 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 483,28 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 170,0 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$10 = 3\,397,78 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ mezcla de hormigón con 15 \% de ceniza}$$

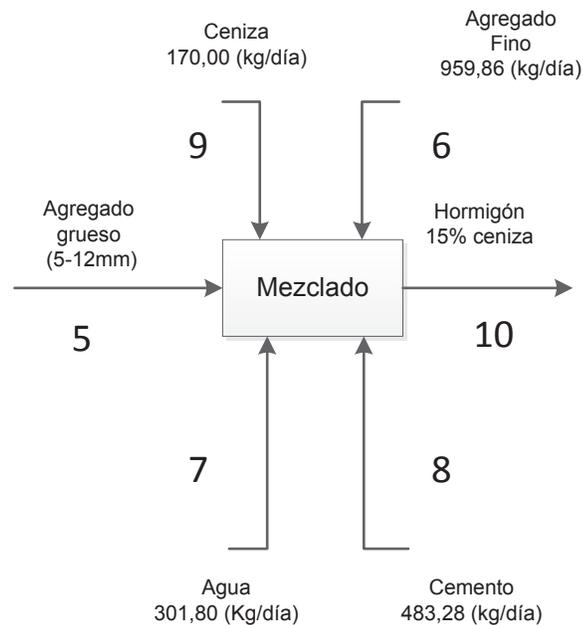


Figura 3.20. Diagrama de bloques del proceso de mezclado para obtención de hormigón con 15 % de ceniza

Una vez que se obtiene la mezcla de hormigón se traslada hacia el equipo vibro compresor que dará forma a los adoquines, de aquí se obtendrán 900 unidades diarias de adoquines de uso peatonal tipo C, con las siguientes dimensiones:

- ✓ Largo: 200 mm
- ✓ Ancho: 100 mm
- ✓ Altura: 80 mm

3.4.3. DIAGRAMAS DEL PROCESO

Las Figuras 3.21 y 3.22 ilustran de manera gráfica los diagramas BFD y PFD, correspondiente al balance de masa del proceso de tratamiento de cenizas provenientes del proceso de incineración en bruto de residuos peligrosos de la planta de GPOWERGROUP S.A; y las características de las diferentes corrientes en el proceso.

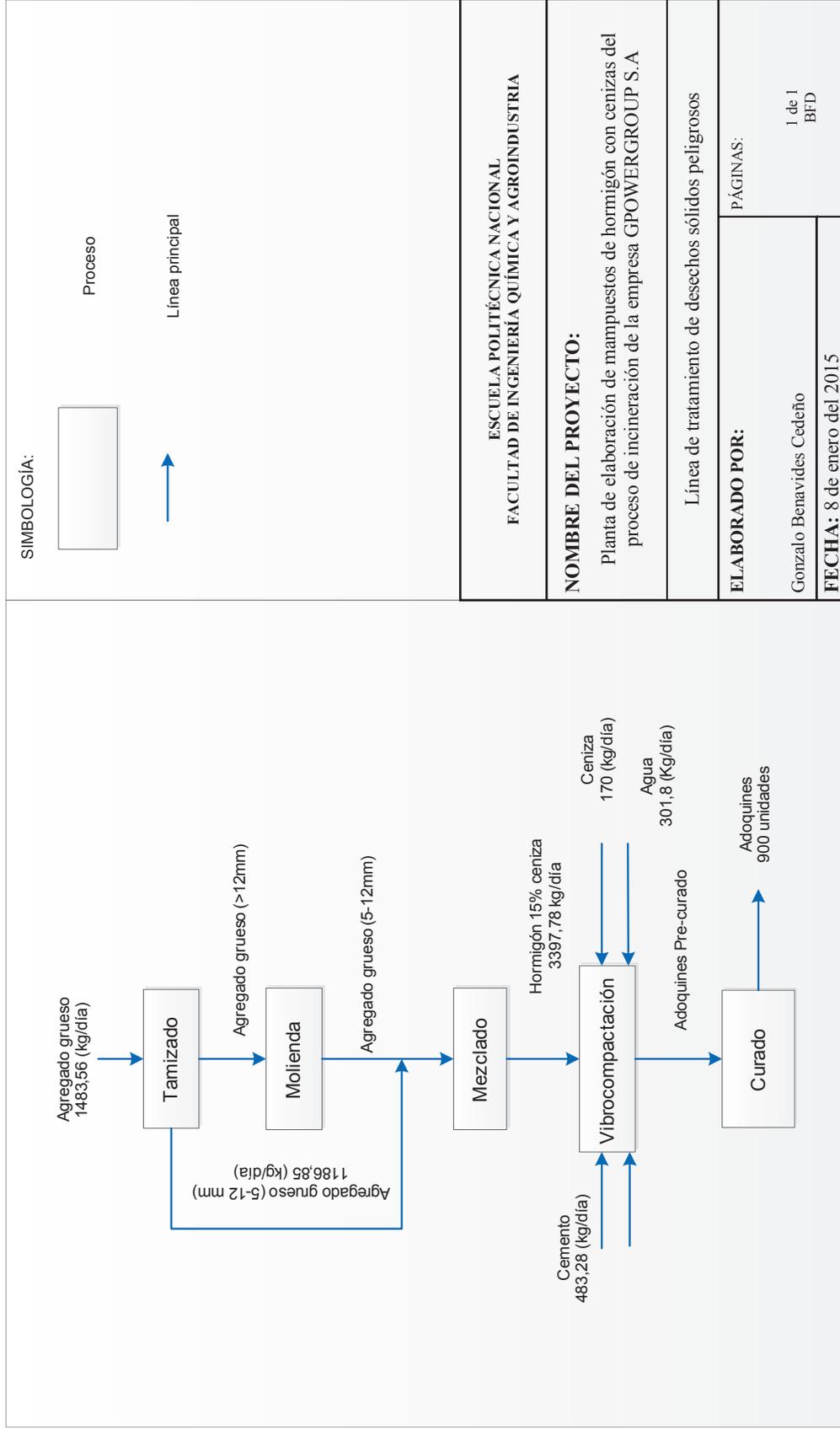


Figura 3.21. Diagrama de flujo (BFD) de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con cenizas

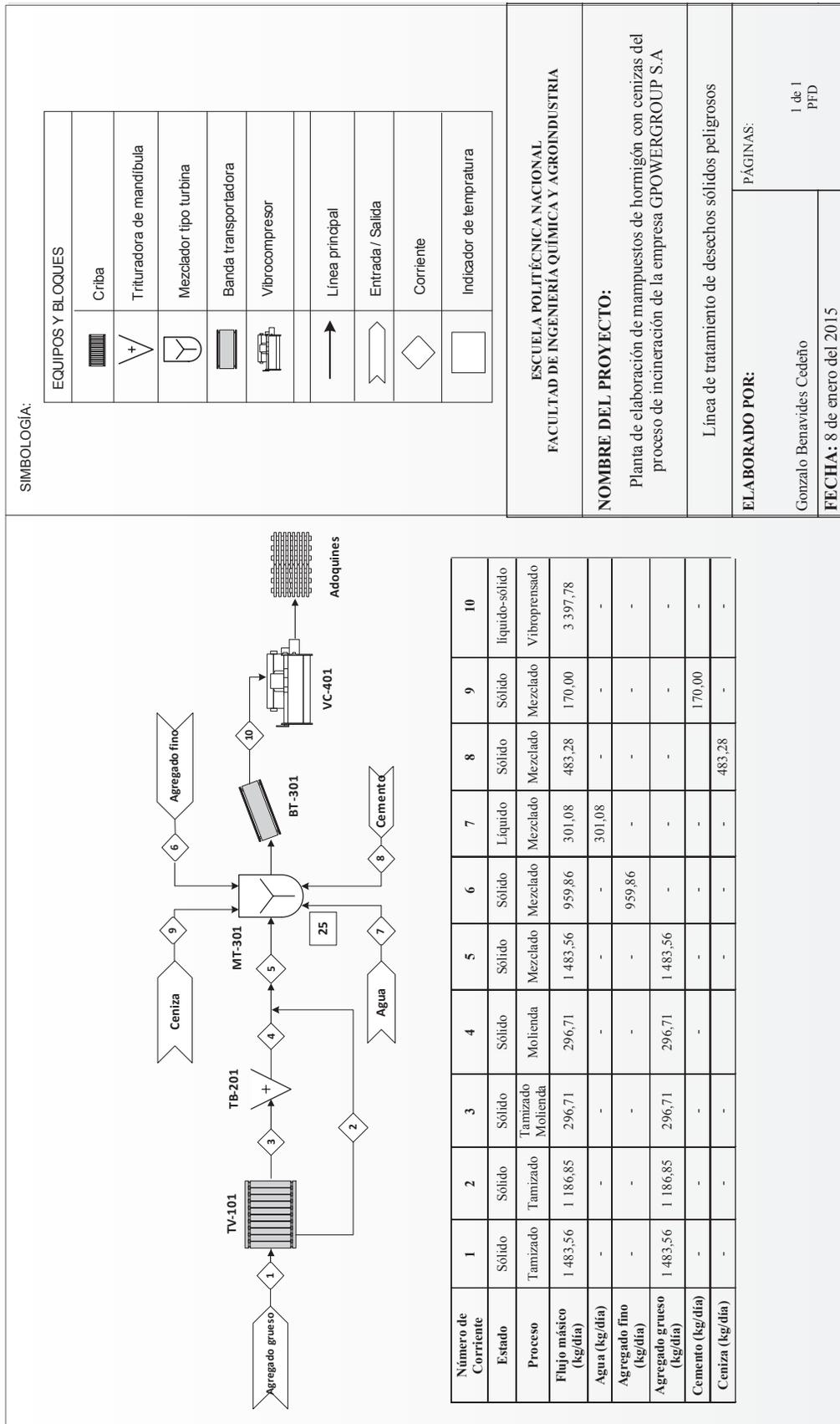


Figura 3.22. Diagrama PFD de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con cenizas

3.4.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La elaboración de adoquines de hormigón con 15% de cenizas provenientes del proceso de incineración de la planta de tratamiento de desechos sólidos GPOWERGROUP S.A inicia con la llegada de la materia prima a las instalaciones del Centro de Tratamiento Integral (CTI): agregados fino (959,86 kg/día) y grueso (1 483,56 kg/día) respectivamente, los sacos de cemento (10 unidades de 50,00 kg), y ceniza (170,00 kg/día), esta última se encuentra actualmente acumulada en un vertedero.

Inicialmente se necesita evaluar el tamaño de partícula del agregado grueso con la finalidad de clasificar y tener un material que cumpla con el tamaño recomendado para elaborar el hormigón el cual debe encontrarse entre 5 – 12 mm. Para esto, se hace pasar el agregado grueso (1 483,56 kg/día) por una criba vibratoria CV-101 (Rivera 2011, p.53).

Después que el material grueso ha sido tamizado, la cantidad de material que no cumplió con el tamaño recomendado, aquel mayor a 12 mm (296,71 kg/día), pasa a la trituradora de mandíbula TB-201 para reducir su tamaño y luego ser enviado junto con el material que si pasó por el tamiz a la mezcladora MT-301.

Una vez que el material grueso se ha clasificado y reducido, es pesado junto con el material fino 959,86 kg/día, cemento 483,28 kg/día, ceniza 170,00 kg/día y agua 301,08 kg/día para ser procesado en una mezcladora tipo turbina MT-301 con descarga manual por la parte inferior; las materias primas se colocarán en un orden determinado: el agregado grueso y fino, la ceniza, el cemento y finalmente el agua, por un tiempo de 4 minutos con una capacidad de bachada de 0,3 m³ hasta completar 1,56 m³ de hormigón mezclado cantidad necesaria para cubrir con la producción de las 900 unidades de adoquines, este equipo constará adicionalmente de un dosificador volumétrico para controlar la cantidad de agua en la mezcla.

Vibrocompactación: una vez que la mezcla de hormigón con 15% de ceniza se encuentra con la textura adecuada y esperada, se la hace pasar por medio de una banda transportadora BT-301 con cierta inclinación hasta la tolva que contiene el equipo de vibrocompresión VC-401, se enrasa el equipo y se procede a elaborar los adoquines, la producción de esta máquina es de 10 adoquines por ciclo y de 90 ciclos por día cumpliendo así con la producción planteada de 900 unidades diarias de adoquines.

Las unidades elaboradas después de permanecer por un período de 24 h de secado al aire se las ubicará en un lugar específico para el curado final, en el cual se mantendrá un ambiente sin pérdida de humedad, para esto se estará constantemente roseando agua.

Culminado el período de 28 días de curado, los adoquines serán utilizados para las diferentes áreas de la planta y sus alrededores como disposición final.

En resumen, los equipos necesarios para el tratamiento de las cenizas provenientes del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROUP S.A mediante el mecanismo de encapsulación por medio de la elaboración de adoquines de hormigón se presentan en la Tabla 3.30.

Tabla 3.25. Listado de equipos por etapas del proceso

Área	Cantidad	Equipo	Nomenclatura
Tamizado	1	Criba vibratoria	CV-101
Molienda	1	Trituradora de mandíbulas	TB-201
Mezclado	1	Mezcladora tipo turbina	MT-301
	1	Banda transportadora	BT-301
Vibrocompactación	1	Vibrocompresora	VC-401

3.4.5. CONSIDERACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

Una vez que se han establecido las operaciones unitarias, los flujos de entrada y salida correspondiente a cada una de ellas, se procede a dimensionar los equipos necesarios para el proceso de elaboración de adoquines de hormigón con ceniza teniendo en cuenta los criterios de diseño señalados a continuación:

3.4.5.1. Criba vibratoria

Para el dimensionamiento de la criba se consideraron los siguientes factores:

- La cantidad de material que ingresa al equipo: 1 483,56 kg/día.
- Tamaño de partícula del agregado grueso recomendado para la elaboración de hormigón entre 5 – 12 mm, el cual sirve para determinar la constante de tamizado equivalente a 17,04 t/m²h.
- Superficie de cribado equivalente a 0,087 m².

En el mercado, se hallan cribas con capacidades equivalentes ya que se diseñan en función de cantidades normalizadas. Para la aplicación de este proyecto, se ha seleccionado la criba más pequeña aprovechable en el mercado marca TARNOS cuya capacidad y dimensiones se especifican en la Tabla 3.26 (Tarnos, 2008, p.2).

3.4.5.2. Trituradora de mandíbula

La capacidad y dimensiones de la trituradora de mandíbulas se determinaron considerando los siguientes factores según (Ortíz y Tirado, 2005, pp. 49-52).

- Ancho mínimo de la abertura de la alimentación la cual se considera un 15% mayor que el tamaño de alimentación, para este caso es equivalente a 30 mm.
- Velocidad mínima de operación aproximadamente 280 rpm.
- Capacidad proyectada de trituración, equivalente a 296, 71 kg/día.

Para esta aplicación, se encontró en catálogo una trituradora de mandíbula marca Metso cuyas características se muestran en la Tabla 3.27 (Metso, 2010, p.20).

Tabla 3.26. Capacidad, dimensiones y características de la criba vibratoria seleccionada por catálogo

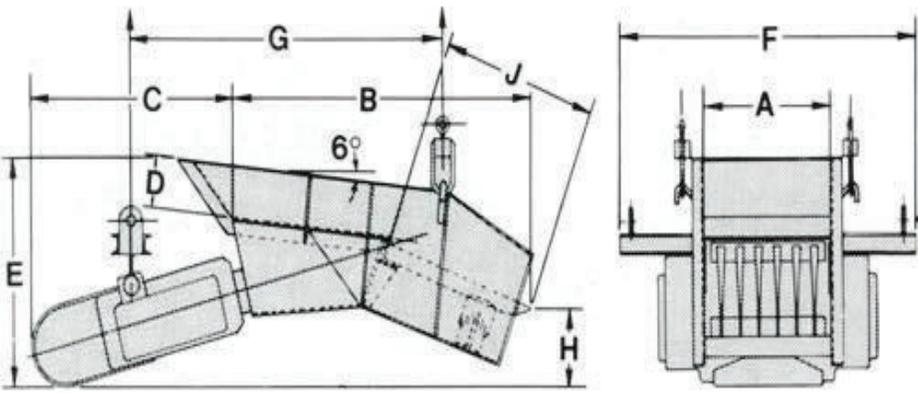
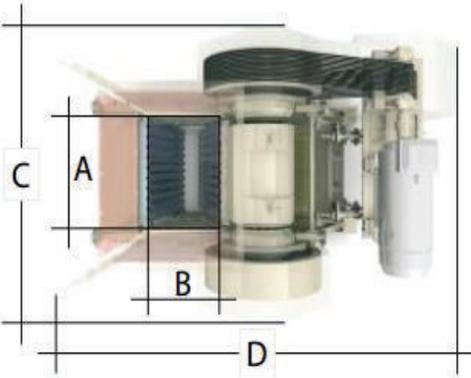
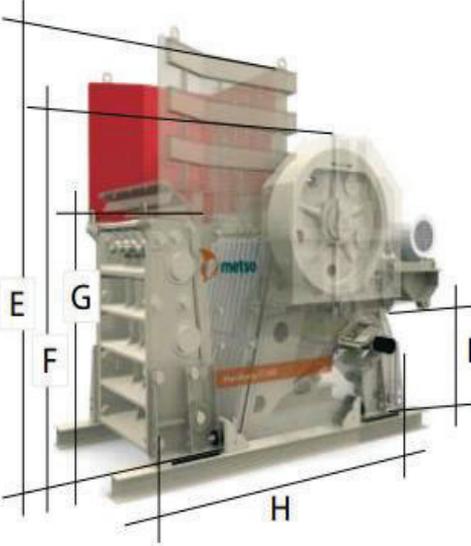
Fabricante: TARNOS	Modelo: F - 280	Material de construcción: Acero Inoxidable						
		Número en planta: CV - 101						
Tamaño de Bandeja: Ancho = 254 mm Largo = 762 mm		Parámetros de diseño: Capacidad: 1 – 5 t/h Potencia: 0,5 kW Tamaño de alimentación: < 40 mm Ángulo de vibración: 15° - 25°						
Modalidad de operación: Proceso Batch								
Esquema del equipo:								
								
Dimensiones (mm)								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
254	749	413	152	616	584	762	248	381

Tabla 3.27. Capacidad, dimensiones y características de la trituradora de mandíbula seleccionada por catálogo

Fabricante: Metso	Modelo: PE150x250	Material de construcción: Acero Inoxidable						
		Número en planta: TB - 201						
Dimensiones: Longitud = 896 mm Ancho = 745 mm Altura = 935 mm		Parámetros de diseño: Capacidad: 1 – 3 t/h Potencia: 5,5 KW Tamaño de alimentación: < 125 mm Tamaño descarga 0 – 30 mm						
Modalidad de operación: Proceso Batch								
Esquema del equipo: <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>								
Dimensiones (mm)								
A	B	C	D	E	F	G	H	I
610	510	745	896	935	775	465	465	755

3.4.5.3. Mezcladora tipo turbina

Para la mezcladora tipo turbina la capacidad y dimensiones se determinaron considerando los siguientes datos.

- La cantidad de ceniza a tratar equivalente a 170,00 kg/día y la cantidad de insumos que se requieren para elaborar la mezcla de hormigón con 15% de ceniza, es decir, la cantidad de agregados (grueso y fino), la cantidad de cemento y agua a agregar correspondientes a 1 483,56 kg/día y 956,86 kg/día, 483,28 kg/día y 301,08 kg/día respectivamente a partir del balance de masa. La capacidad total que se requiere en la mezcladora es de 3 397,78 kg/día.
- Tiempo de mezclado equivalente a 4 minutos.

Dentro del mercado, para esta aplicación se encontró una mezcladora vertical tipo turbina con descarga manual por la parte inferior marca Proyecol cuya capacidad se muestra en la Tabla 3.28; el flujo volumétrico que se maneja diariamente es 1,56 m³, pero, el equipo disponible tiene una capacidad de bachada de 0,30 m³ resultando insuficiente para realizar toda la mezcla requerida en un solo ciclo. De tal manera, se decidió realizar 5 ciclos al día de 679,55 kg para evitar adquirir más equipos (Proyecol, 2014, p.2).

3.4.5.4. Banda transportadora

Para esta aplicación, dentro del mercado se encontró una banda sin fin de dos lonas marca Proyecol cuyas especificaciones se encuentran detalladas en la Tabla 3.29. Las dimensiones de la banda transportadora se determinaron con base en los siguientes factores (Proyecol, 2014, p.3).

- Velocidad de la cinta, para el caso particular fue de 2,5 m/s como máxima.
- Tipo de material de la cinta el cual se necesita que sea flexible.
- El ancho de la banda transportadora equivalente a 0,5 m

Tabla 3.28. Capacidad, dimensiones y características de la mezcladora tipo turbina seleccionada por catálogo

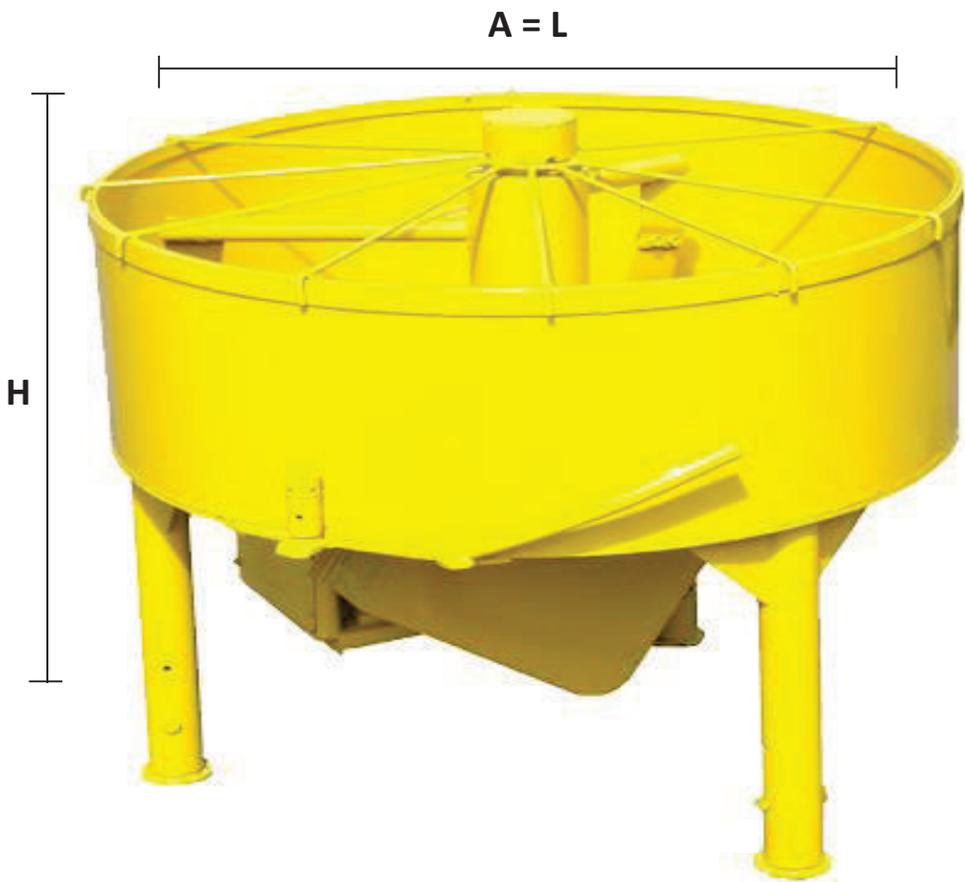
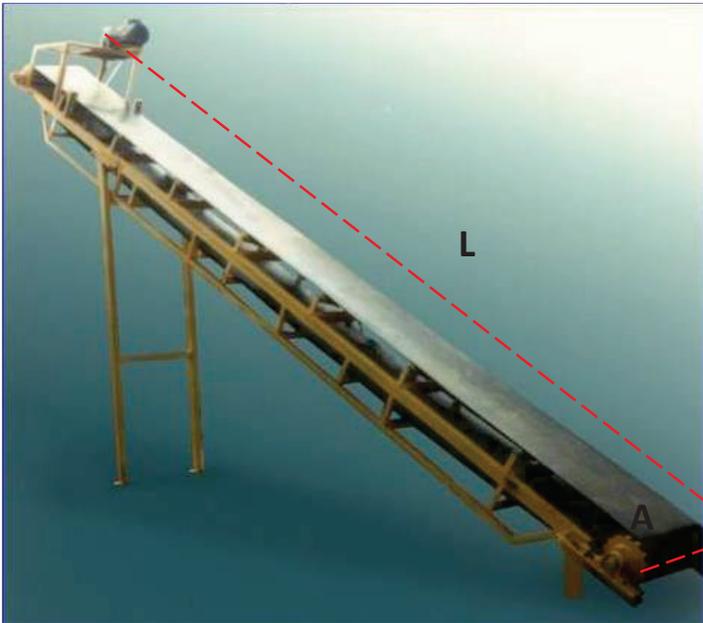
Fabricante: Proyecol	Modelo: LM 01001	Material de construcción: Acero ARX 400
		Número en planta: MT - 301
Dimensiones: Longitud = 1 200 mm Ancho = 1 200 mm Altura = 1 600 mm		Parámetros de diseño: Capacidad: 350 L Potencia: 6,6 HP Tiempo de mezclado: 5 min
Modalidad de operación: Proceso Batch		
Esquema del equipo:  <p>El diagrama muestra una mezcladora tipo turbina de color amarillo. Se indica la longitud del eje de la turbina como $A = L$ y la altura total del equipo como H. La mezcladora tiene un cuerpo cilíndrico superior y un cono inferior, montada sobre cuatro patas.</p>		

Tabla 3.29. Dimensiones y características de la banda transportadora seleccionada por catálogo

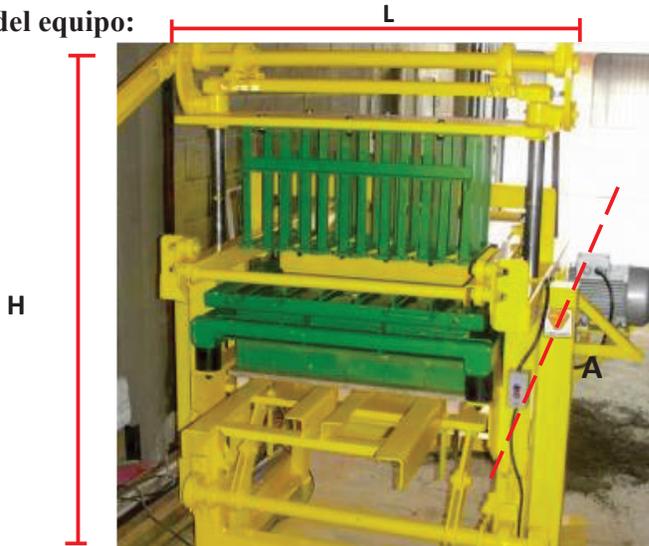
Fabricante: Proyecol	Modelo: LEC01037	Material de construcción: aluminio/Acero Inoxidable
		Número en planta: BT - 301
Dimensiones: Longitud = 6,0 m Ancho = 0,5 m		Parámetros de diseño: Potencia: 4 HP Velocidad: 0,5 – 4,0 m/s
Modalidad de operación: Proceso Batch		
Esquema del equipo:		
		

3.4.5.5. Equipo vibrocompactador

En el mercado se puede encontrar vibrocompactadoras mecánicas que elaboren adoquines con las especificaciones de tamaño antes mencionadas, con base en este criterio se seleccionó el equipo vibrocompactador marca Proyecol cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 3.30 (Proyecol, 2014, p.2). El equipo de vibrocompactación se escogió con base en:

- Cantidad de mezcla de hormigón determinada a partir del balance de masa equivalente a 3 397,78 kg/día.
- Dimensiones de los adoquines a elaborar largo, ancho y alto.
- Unidades de adoquines a elaborar equivalentes a 900 diarias.

Tabla 3.30. Dimensiones y características del vibrocompactador seleccionado por catálogo

Fabricante: Proyecol	Modelo: BQ 60-40	Material de construcción: Acero Inoxidable
		Número en planta: MT - 401
Dimensiones: Longitud = 1 700 mm Ancho = 1 400 mm Altura = 1 800 mm		Parámetros de diseño: Ciclos por hora: 90 Adoquines por ciclo: 10 Potencia: 3 HP
Modalidad de operación: Proceso Batch		
Esquema del equipo: 		

3.4.6. METODOLOGÍA DE CONTROL

En la planta piloto para la elaboración de mampuestos de hormigón con ceniza se ha propuesto un control automático para la etapa de mezclado como se observa

en el PI&D de la Figura 3.23. En esta etapa del proceso se requiere un tiempo de mezclado de los sólidos para garantizar la homogeneidad de la mezcla antes de agregar el agua, la incorporación de esta última es necesario controlar con mayor cuidado ya que de esto depende la consistencia de la mezcla, y puede influir en las propiedades físicas en estado fresco y endurecido.

De esta manera es necesario tomar acciones preventivas para la correcta elaboración de la mezcla de hormigón con ceniza. Se propone controlar el flujo de agua que entra a la mezcla, así como controlar el tiempo de mezclado de las materias primas sólidas mediante un control cascada. El sistema que se muestra en la Figura 3.23 contiene un sensor que se encuentra enlazado al transmisor (TMT-01), este envía una señal eléctrica al controlador (TMC-01) actuando como un control secundario y comparará la señal recibida con el valor que se desea, y dependiendo del resultado fijará la señal al controlador de flujo (FC-01), el que dará la orden al elemento de control (VC-301) el cual se trata de una válvula solenoide, normalmente cerrada, de acción directa la cual controlará el flujo de entrada al mezclador. El detalle del sistema de control se presenta en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31. Detalle del sistema de control del mezclador MT - 301

Elementos	Descripción	Nomenclatura
Sensor	Tiempo de mezclado	N/A
Transmisor	Eléctrico	TMT - 01
Controlador	Digital - PID	TMC - 01
Controlador	Digital - PID	FC - 01
Elemento de control	Señal neumática – válvula de control	VC - 301

La selección de la tubería y la válvula para el flujo de agua que va hacia el mezclador se realizó con base en el dosificador volumétrico a usar, la selección de estos elementos se detallan en la Tabla 3.32 y se representan en el diagrama PI&D.

Tabla 3.32. Descripción de la tubería de agua a ser utilizada

N° de Corriente	Denominación	Diámetro nominal (plg)	Cédula	Fluido	Material	Accesorio
1	25,4-AP-07-CSSA	1	40	Agua potable	Acero al carbono	Válvula solenoide

3.4.7. DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Se estableció una distribución en planta de los equipos, así como de las instalaciones administrativas y áreas operativas que complementan el proceso dentro de la planta de GPOWERGROUP S.A; la vista en planta se encuentra representada en el diagrama *layout*, Figura 3.24 y la descripción de las diferentes áreas se presenta en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Detalle de áreas correspondiente al layout de la planta piloto para la elaboración de adoquines de hormigón con ceniza.

Área	Nomenclatura
Almacenamiento de ceniza	A
Almacenamiento de cemento	B
Almacenamiento de agregado fino	C
Almacenamiento de agregado grueso	D
Clasificación de material grueso por tamizado	E
Reducción de tamaño material grueso	F
Espacio para elaboración de adoquines	G
Puntos de lavado	H
Baños para operarios de planta	I
Parqueaderos	J
Área Administrativa	K
Espacio para el curado de adoquines	L

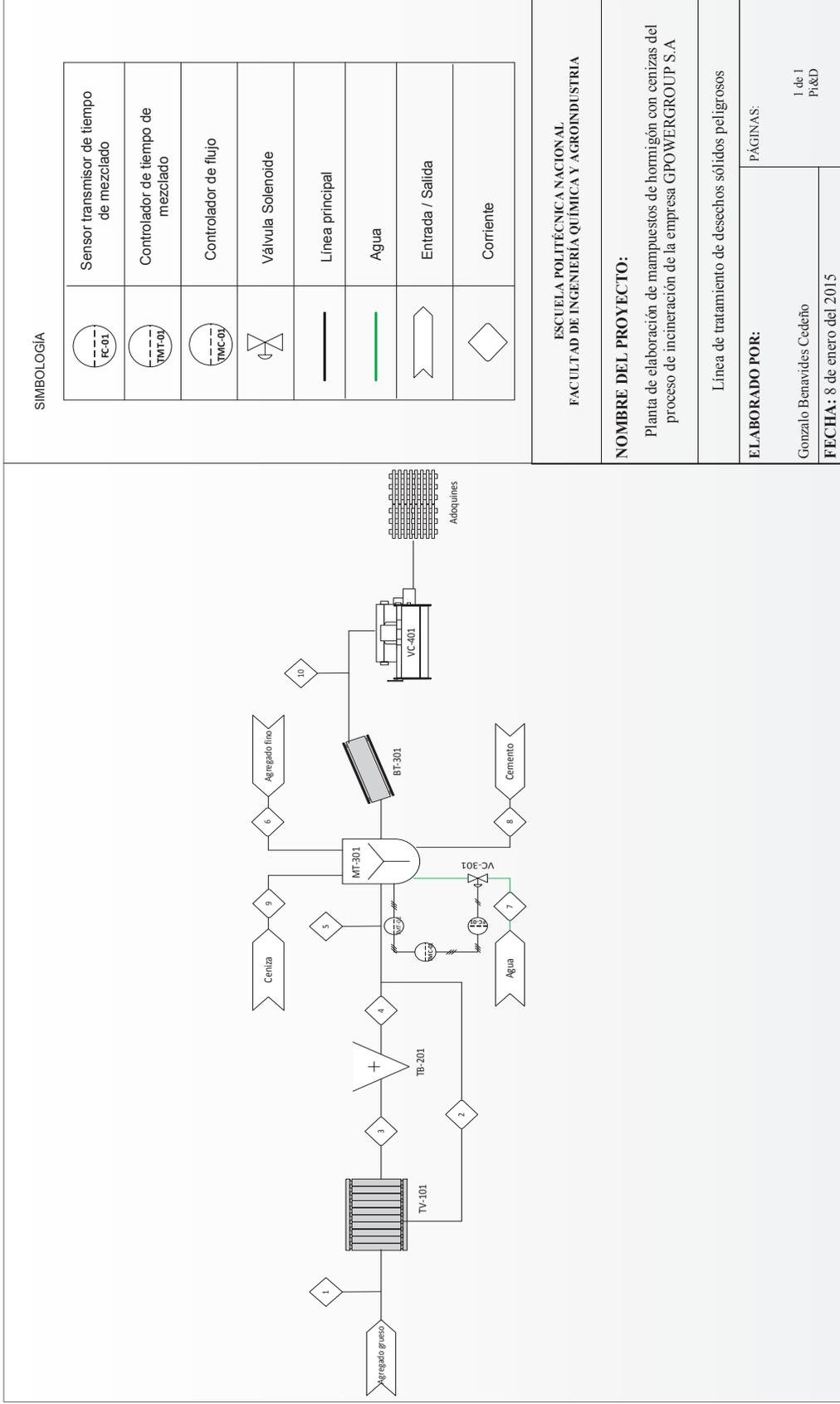
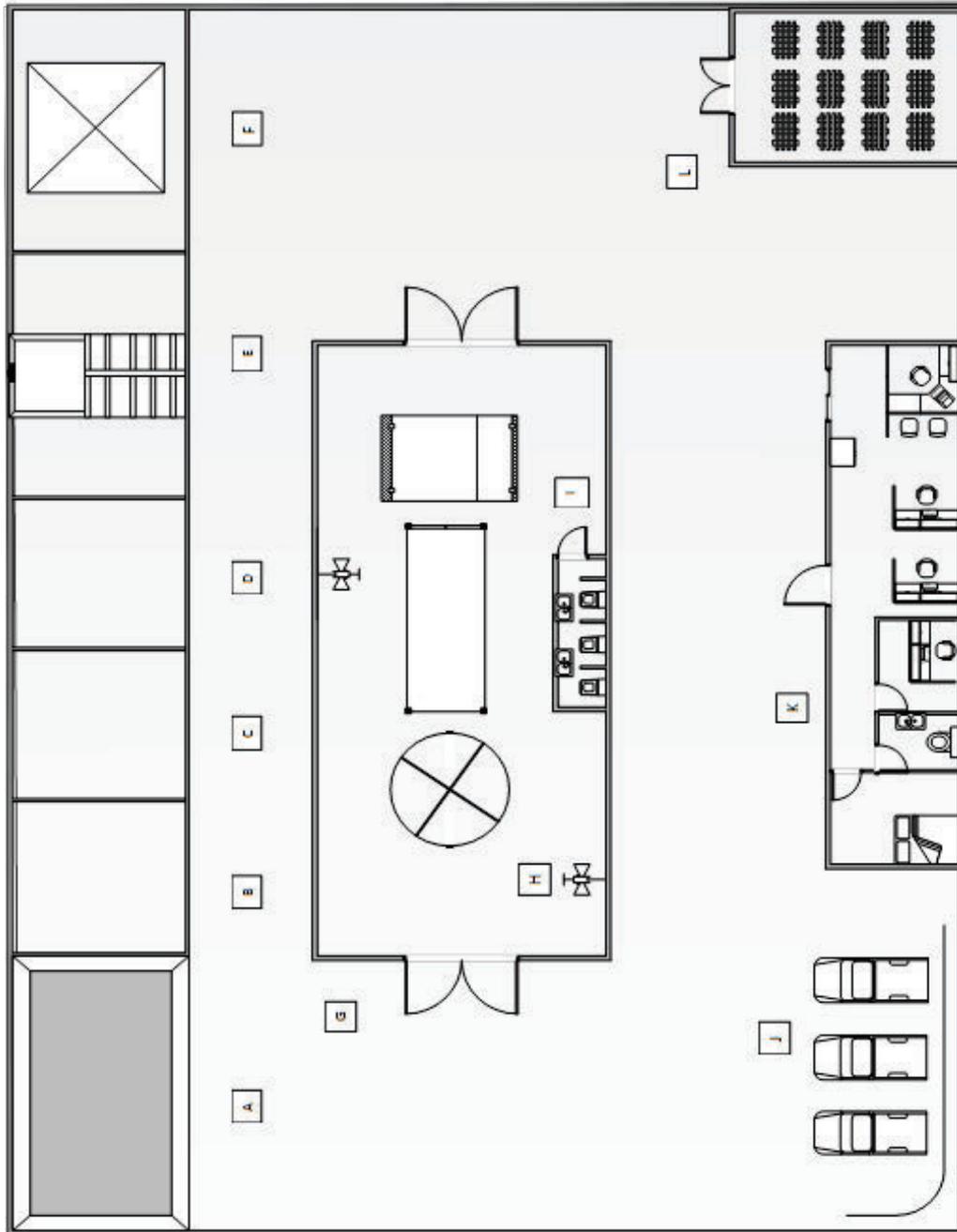


Figura 3.23. Diagrama PI&D de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con ceniza

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA	
NOMBRE DEL PROYECTO: Planta de elaboración de mampuestos de hormigón con cenizas del proceso de incineración de la empresa GPOWERGROUP S.A	
Línea de tratamiento de desechos sólidos peligrosos	
ELABORADO POR: Gonzalo Benavides Cedeño	PÁGINAS: 1 de 1 Pi&D
FECHA: 8 de enero del 2015	



E SCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		08/01/2015	
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA		FECHA	
NOMBRE DEL PROYECTO: Planta de elaboración de mampuestos de hormigón con ceniza del proceso de incineración de la empresa GPOWERGROUP S.A			
TÍTULO: Layout de la Planta de elaboración de mampuestos de hormigón con ceniza del proceso de incineración de la empresa GPOWERGROUP S.A			
Línea de tratamiento de desechos peligrosos			
ESCALA	FORMATO	FORMATO PLANO	REALIZADO POR:
1 : 100	A3	1 / 1 1	Gonzalo Benavides Cedeño
			PÁG:
			1

Figura 3.24. Layout de la planta para la elaboración de adoquines de hormigón con ceniza

3.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

La propuesta económica detallada a continuación, se realizó con base en el análisis de los costos de inversión fija y los costos de operación requeridos en la implementación de la planta piloto para el tratamiento de las cenizas generadas del proceso de incineración de la planta de GPOWERGROIP S.A., mediante la elaboración de 900 unidades diarias de adoquines de hormigón con 15% de esta ceniza. En la Tabla 3.34 se presentan los parámetros utilizados para la valoración económica del proyecto.

Tabla 3.34. Parámetros utilizados en la valoración económica del proyecto

Parámetro	Unidad	Valor
<u>Laboral</u>		
Aporte Patronal al IESS	% Sueldo	11,15
Número de turnos de trabajo	N/A	1
<u>Construcción</u>		
Bodegas y galpones	USD/m ²	300,00
Oficinas	USD/m ²	300,00
Infraestructura	USD/m ²	350,00
<u>Mantenimiento</u>		
Equipos	% valor de equipo	1
Edificios	% valor de construcción	2
<u>Depreciación</u>		
Edificios	años	10
Maquinaria y equipo	años	5
Muebles y equipo de oficina	años	5
Otros activos	años	5

(Ministerio del Trabajo, 2015; Narváez, 2012, pp.65-72; SRI, 2013, p.19)

3.5.1. COSTOS DE INVERSIÓN FIJA

Dentro de la inversión fija que se necesita para el desarrollo del proyecto se encuentran los costos de equipos, construcciones e instrumentación, no se considera el rubro de terreno debido a que la planta piloto para la fabricación de los adoquines se la ubicará dentro del área del Centro de Tratamiento Integral de la empresa GPOWERGROUP S.A., ocupando un espacio de 40 m largo por 30 m de ancho, como se indica en la Figura 3.19. El detalle de la inversión fija se encuentra desglosado en las Tablas 3.35 y 3.36.

Tabla 3.35. Detalle de inversión fija en equipos, tubería y accesorios

Equipos				
Ítem	Planta o unidad productiva	Número de unidades	Valor unitario (USD)	Valor total (USD)
Criba	Planta de adoquines	1	2 500,00	2 500,00
Trituradora de mandíbulas		1	33 000,00	33 000,00
Banda transportadora		1	1 800,00	1 800,00
Mezcladora de hormigón		1	2 500,00	2 500,00
Vibrocompresora		1	21 500,00	21 500,00
Total				61 300,00
Tuberías y accesorios				
Ítem	Longitud (pie) - cantidad	Valor por pie (USD/pie)	Valor total (USD)	
Tubería de acero al carbón de 1"	66,00	10,00	660,00	
Válvula Solenoide de 1"	1	65,00	65,00	
Total				725,00

(Proyecol, 2014, pp.2-3, Metso, 2010, p.20; Tarnos, 2008, p.2; Dávalos, 2014, p.83)

Tabla 3.36. Detalle de costos de inversión fija

Denominación	Valor (USD)	Contribución porcentual (%)
Inversión fija		
<u>Construcciones</u>		
Almacenamiento de materia prima		
Bodega producto terminado	30 000,00	25,02
Bodega de insumos		
Planta		
<u>Equipos</u>		
	61 300,00	51,12
<u>Instalación de equipos</u>		
	12 260,00	10,22
<u>Tuberías y accesorios</u>		
	725,00	0,60
<u>Capital de operación</u>		
	15 642,17	13,04
Total de inversión	119 927,17	100,00

(Guerra, 2013)

El valor total de la inversión fija para el tratamiento de la ceniza generada en el proceso de incineración en bruto de residuos industriales en la planta de GPOWERGROPUS S.A, mediante la implementación de una planta piloto para la elaboración de adoquines de hormigón con dicha ceniza es de USD 119 927,17 valor que incluye los costos: de equipos e instalación, tuberías y accesorios, construcciones y capital de operación necesario para implementar dicha planta. La Tabla 3.36 indica que, los rubros con mayor porcentaje de representatividad en los costos de inversión fija son la adquisición de equipos y la construcción, aproximadamente el 76%.

3.5.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos dentro de este rubro pertenecen principalmente a materias primas, servicios industriales y nómina de personal laboral. Cada uno de estos gastos se detalla en las Tablas 3.37 y 3.38, el detalle anual de todos los rubros se presentan en la Tabla 3.39.

Tabla 3.37. Detalle de costos de materia prima y servicios básicos

Ítem	Costo MP (USD)	Cantidad diaria	Cantidad anual	Costo anual (USD)
Agregado fino (m ³)	3 140,00	0,42	151,00	474,77
Agua potable (m ³)	0,02	0,30	108,00	2,16
Agregado grueso (m ³)	11,24	0,58	210,00	2 364,43
Ceniza (kg)	-	170,00	61 200,00	0,00
Cemento (sacos de 50 kg)	8,50	10,00	3 600,00	30 600,00
Total				33 441,35
Servicios básicos				
Ítem	Costo MP (USD)	Cantidad diaria	Cantidad anual	Costo anual (USD)
Energía eléctrica (kw-h)	0,08	140,00	50 400,00	4 032,00
Agua lavado (m ³)	0,02	10,00	3 600,00	68,40
Total				4 100,40

(INEC, 2015; EMAAP-Q, 2015; EEQ, 2015)

Tabla 3.38. Gastos en personal laboral

Personal	Detalle	Costo unitario (USD)	Costo Mensual (USD)	Costo anual + beneficios de ley (USD)
Supervisor de planta	1	1 200,00	1 200,00	14 691,70
Operarios	4	500,00	2 000,00	3 848,69
Limpieza	2	500,00	1 000,00	12 296,75
Guardianía	1	500,00	500,00	6 298,38
Total				36 825,69

Tabla 3.39. Resumen de costos de operación

Designación del rubro	Valor (USD)	Contribución porcentual (%)
<u>Gastos administrativos</u>		
Materiales directos	33 441,35	33,91
Personal laboral	37 135,52	37,66
Servicios Industriales	4 100,40	4,16
<u>Depreciación</u>		
Construcciones	1 500,00	1,52
Equipos	12 260,00	12,43
Muebles y equipos de oficina	0,00	0,00
Otros Activos	0,00	0,00
<u>Mantenimiento</u>		
Equipos	613,00	0,62
Edificios	600,00	0,61
<u>Sub-total costos de producción</u>		89 650,27
<u>Imprevistos (10 %)</u>		8 965,03
Total costos anuales de producción	98 615,30	100,00

(Narváez, 2012, pp.65-72; Guerra, 2013)

En la Tabla 3.39 se detalla el costo de operación total, al cual se ha incluido los costos de mantenimiento y depreciación de los equipos utilizados, además de un valor adicional para imprevistos dentro de la implementación de la planta piloto correspondiente al 10 % del total de costos de operación. Cabe aclarar que los valores de ciertos rubros son cero, con base en la implementación de la planta piloto de elaboración de adoquines de hormigón, la cual se ubicará dentro del Centro Integral de Tratamiento, con ello no se consideran los valores de activos fijos del área administrativa, como muebles y equipos de oficina, etc.

De la información presentada en la Tabla 3.39 se desprende que los materiales directos constituyen casi el 40 % de los costos operación; el personal laboral constituye el 37 % de los costos; y que los demás rubros constituyen el 23 % restante; es necesario recalcar que el costo de la materia prima y la mano de obra están expuestos al mercado y podrían variar de acuerdo a este.

El valor total de costos de operación es de USD 98 615,30 en el cual se incluyen gastos operativos, nómina laboral, mantenimiento de equipos e instalaciones (semestrales); depreciación de equipos e imprevistos varios. Este proyecto no tiene un valor de rescate debido a que la legislación ambiental nacional no permite que se pueda realizar una actividad económica de un residuo en forma libre, mucho menos con algún tipo de tratamiento fisicoquímico para su disposición final. Por lo tanto, no se consideran indicadores económicos como, el valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR), punto de equilibrio.

Por otro lado, debe considerarse que el tratamiento de ceniza generada a partir del proceso de incineración en bruto por parte de un gestor ambiental calificado, causaría un gasto de 33 721,30 USD/año. Puesto que el costo de tratamiento de este tipo de residuos sólido es de 0,60 USD/kg, gasto que se aproximaría al 28,11% de la inversión inicial fija en el caso de la implementación de la planta piloto para la elaboración de adoquines con inclusión de esta ceniza.

3.5.3. BENEFICIO AMBIENTAL

El tratamiento de la ceniza por medio del mecanismo de encapsulación puede implicar afectación al suelo si los desechos tratados no se manejan adecuadamente. Sin embargo, el resultado de este proceso busca reducir el impacto ambiental mediante: la reducción de materias primas requeridas para la elaboración de adoquines de hormigón, elaboración de materiales compuestos a partir de residuos sólidos, y la búsqueda de otras alternativas de disposición final, teniendo en cuenta los criterios de jerarquización de la gestión de desechos; por

lo cual se priorizará la prevención de la generación, el aprovechamiento y la valorización de los mismos.

Mediante la implementación de este proyecto la empresa GPOWERGROUP S.A obtiene: una nueva alternativa de disposición final para las cenizas generadas en el proceso de incineración que se lleva a cabo en el Centro Integral de Tratamiento y que se incluya dentro en su Plan de Manejo Ambiental. Manejar una gestión medioambiental bien efectuada que podría considerarse muy bueno para el negocio. Por último, ser recíproco con la comunidad y ayudar con el ornato de la misma.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La ceniza proveniente del proceso de incineración en bruto de residuos industriales de la planta de GPOWERGROUP S.A se cataloga como un desecho especial bajo la Norma Técnica de Desechos Peligrosos descrita en la Resolución 002-SA-2014 correspondiente a la Ordenanza No. 404 del Distrito Metropolitano de Quito mediante el análisis de toxicidad TCLP realizado a la ceniza en estado libre, el cual determinó que las concentraciones de arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio en la ceniza libre estuvieron por debajo de los límites permisibles. Sin embargo, la concentración de bario en la ceniza libre (11,0 mg/L) comparada con el resto de metales pesados, fue superior.
- La ceniza generada en la planta de la empresa GPOWERGROUP S.A es de tipo C según la norma ASTM C618, cumpliendo con un mínimo del 50% en la suma de los compuestos: óxido de silicio, óxido de hierro y óxido de aluminio, los cuales representan un 58,1% de la composición total de la misma, por lo tanto, es apta para la elaboración de hormigón de ceniza volante y puzolana natural.
- Las propiedades determinadas en la caracterización física de la ceniza son: 2,30 g/cm³; 0,93 g/cm³; 87,61%; 17,16 y 1,52 mm correspondientes a la densidad real, densidad aparente, porcentaje de vacíos, humedad, y granulometría (d₈₀) respectivamente. Verificando que la ceniza puede utilizarse como reemplazo del agregado fino, ya que su tamaño de partícula es menor a éste (2,36 mm) y cumple con el tamaño recomendado en la elaboración de hormigón, menor a 5,00 mm.
- La dosificación para elaborar 1 m³ de mezcla de hormigón convencional de f'c = 210 kg/cm² y la trabajabilidad apropiada para la elaboración de

adoquines está dada por la siguiente relación en peso 0,62: 1,00: 2,34: 3,07 de agua; cemento; agregado fino y agregado grueso respectivamente.

- La resistencia a la compresión y módulo de elasticidad fueron equivalentes a 202,79 kg/cm² y 33,94 GPa respectivamente cuando se trabajó con 15% de ceniza en mezcla, respecto al hormigón convencional cuyos valores fueron 208,37 kg/cm² y 24, 51 GPa. Por lo tanto, la evaluación del comportamiento físico-mecánico determinó que la mezcla de hormigón con 15% de ceniza es la más adecuada; y se consideró como base para el diseño de la planta piloto de tratamiento de la ceniza generada en el proceso de incineración en bruto de residuos industriales de la planta GPOWERGROUP S.A.
- El tratamiento de encapsulamiento de las cenizas por medio de la elaboración de adoquines de hormigón, demostró la eficiencia del mismo al reducir la concentración de metales en el lixiviado hasta un 97,45 % para el bario y 93,91% para el níquel, para los metales: arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio existieron concentraciones por debajo del nivel mínimo de detección del equipo.
- Se diseñó la planta piloto para la fabricación de 900 unidades diarias de adoquines de uso peatonal tipo C. En la planta se observa la implementación de una criba vibratoria con tamaño de alimentación menor a 40 mm; una trituradora de mandíbula con capacidad con tamaño de alimentación menor a 125 mm y tamaño de descarga de 0 - 30 mm; una mezcladora tipo turbina con eje vertical cuya capacidad nominal es de 0,35 m³ con descarga inferior; una banda transportadora de 6 m de longitud con velocidad entre 0,5-4,0 m/s y un vibrocompactador cuya capacidad es de 10 adoquines/ciclo, 90 ciclos/h cumpliendo con la producción diaria.
- El valor total de la inversión fija para la implementación de la planta piloto se aproxima a los USD 119 927,17, mientras que, el valor total de los costos de operación bordea los USD 98 615,30; comparado con el costo

que representaría contratar un gestor calificado para la disposición final de la ceniza, equivalente a 33 721,30 USD/año, es decir, que en un más de tres años estaría cubierta la inversión fija inicial del proyecto.

- Técnicamente la sustitución de la ceniza como reemplazo del agregado fino en el hormigón es factible de aplicar, sin embargo, es necesario analizar la parte económica del proyecto. Debido a que no se puede realizar una actividad comercial a partir de residuos en estado libre, ni aún realizado un tratamiento previo, por lo que no existe un valor de rescate en el proyecto. Sin embargo, la empresa GPOWERGROUP S.A., implementando la planta piloto para la elaboración de adoquines de hormigón con ceniza obtiene una nueva alternativa de tratamiento para este tipo de residuos y beneficios que conlleva la parte medioambiental, social y económica.

4.2. RECOMENDACIONES

- Evaluar las propiedades mecánicas del hormigón reemplazando el cemento por ceniza en su elaboración, lo cual disminuiría más los costos de materias primas.
- Realizar estudios complementarios acerca del comportamiento de los hormigones con resistencias a la compresión mayores a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ agregando cenizas de procesos de incineración de desechos sólidos.
- El estudio técnico y económico es un análisis que demuestra lo factible y rentable que puede llegar a ser este tipo de empresa para invertir. De acuerdo lo anterior es necesario realizar una evaluación por parte de las autoridades ambientales y que puedan dar el visto bueno en la utilización de estos residuos para elaboración de este tipo de materiales y realizar una actividad comercial de la misma siempre que se compruebe que estos residuos cumplen con la normativa ambiental vigente en el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI. (2001). *Guía para la durabilidad del hormigón*. Recuperado de http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_201_2R_01.pdf (Abril, 2015)
2. ACI. (2002). *Práctica Estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo*. Recuperado de https://www.academia.edu/6871828/Standard_Practice_for_Selecting_Proportions_for_Normal_Heavyweight_and_Mass_Concrete_ACI_211.1-91_Reported_by_ACI_Committee_211_Committee_Members_Voting_on_1991_Revision_CONTENTS (Junio, 2014)
3. ACI. (2008). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-08)*. Recuperado de <http://www.separadoresatecon.com/Portals/0/Articulos%20Interes/ACI-318-08-REGLAMENTO-PARA-CONCRETO-ESTRUCTURAL-98-101.pdf> (Abril, 2014)
4. Anastasiadou, K. Christopoulos, K. Mousios, E. y Gidaragos, E. (2012). Solidificación/Estabilización de cenizas volantes y cenizas de fondo de las instalaciones de incineración de desechos médicos. *Revista de Materiales peligrosos*, 207-208(2012) 165-170. doi:10.1016/j.jhaz.mat2011.05.027
5. ASTM. (1999). Método estándar para la temperatura de mezclas frescas de concreto. Recuperado de <http://compass.astm.org.bvirtual.epn.edu.ec/download/C1064C1064M-99.19033.pdf> (Junio, 2014)
6. ASTM. (2005). Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio de las velocidades de pulso y las constantes elásticas ultrasónicas de roca. Recuperado de <http://enterprise2.astm.org/DOWNLOAD/D2845.1093127-1.pdf> (Julio, 2014)

7. ASTM. (2011). Método de ensayo normalizado para resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto. Recuperado de <http://enterprise2.astm.org/DOWNLOAD/C496.1093127-1.pdf> (Julio, 2014)
8. ASTM. (2012). Especificación normalizada de ceniza volante de carbón y puzolana natural en crudo o calcinada para uso de concreto. Recuperado de <http://compass.astm.org.bvirtual.epn.edu.ec/download/CCA10230J.30020.pdf> (Julio, 2014)
9. ASTM. (2014a). Método de prueba estándar para contenido de aire del hormigón fresco por el método de presión. Recuperado de http://enterprise2.astm.org/DOWNLOAD/C231.10931271.pdf#_ga=1.264601798.878747611.1405962012 (Julio, 2014)
10. ASTM. (2014b). Método de prueba estándar para la densidad, absorción, y huecos en hormigón endurecido. Recuperado de <http://enterprise2.astm.org/DOWNLOAD/C642.1093127-1.pdf> (Julio, 2014)
11. ASTM. (2014c). Método de prueba estándar para la resistencia a la extracción de la barra corrugada en hormigón endurecido. Recuperado de <http://compass.astm.org.bvirtual.epn.edu.ec/Standards/HISTORICAL/C900-14.htm> (Julio, 2014)
12. Ballesteros, S. Refugio, J. y Rincón J. (2010). Vitrificación para inmovilizar residuos peligrosos. *Revista Ciencia y desarrollo*, 36(243), 6-11. Recuperado de <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/243/Articulos/Vitrificacion/Vitrificacion1.html> (Marzo, 2015)
13. Bañon, Luis. y Beviá, J. (2000). *Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento*. (1ra. ed). Alicante, España: Ortiz e hijos, Contratista de Obras S.A.

14. Bolívar, O. (2006). Dosificación de mezclas de hormigón. Recuperado de <http://www.unalmed.edu.co/hormigon/archivos/laboratorio/mezclas04b.pdf> (Marzo, 2015)
15. Casas, J. Torras, A. Garriga, E. y Martell, M. (2005). Gestión de los residuos Sólidos Urbanos: Los residuos municipales y su gestión. (1ra. ed). Barcelona, España: Treballs Grafics, SA
16. Castells, X. (2001). Residuos hospitalarios: la incineración y la destrucción térmica. Seminario Tratamiento Avanzado de Residuos Hospitalarios, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/Ponencias-ID54.pdf> (Julio, 2014)
17. Castells, X. (2003). Incineración de residuos: los residuos como combustible. Nociones sobre la combustión. Seminario de Incineración y su Adecuación a la Resolución 0058, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/Ponencias-ID79.pdf> (Julio, 2014)
18. Castells, X. (2005). Sistemas de Tratamiento Térmico: La Incineración. (1ra. ed.). Madrid, España: Días de Santos.
19. Castells, X. (2009). Reciclaje de Residuos Industriales: Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora. (2da. ed.). Madrid, España: Díaz de Santos.
20. Castells, X. y Velo E. (2012). Tratamiento y Valorización Energética de Residuos: La Gasificación. (1ra. ed). Madrid, España: Días de Santos.
21. Castro, D. Movilla, D. Vega, A. y Calzada, M. (2011). Estabilización con cal de lodos de bentonita del proceso de perforación de pozos. Revista Ciencia aplicada a la arcilla, 51(3), 250-257

22. CEDEX. (2008). Actualización de catálogo de residuos utilizables en construcción. Recuperado de <http://www.cepco.es/Uploads/docs/Actualizacion%20del%20catalogo%20de%20residuos%20utilizables%20en%20construccion.pdf> (Agosto, 2014)
23. CESPV. (2004). La Problemática Ecológica en torno a la Incineración de R.S.U. Recuperado de http://www.coopcentabc.org.br/documentos/incineracao/O_Problema_Ecologico_da_Incineracao_na_Espanha.pdf (Julio, 2014)
24. CORANTIOQUIA. (2011). Requerimientos Técnicos y Normativos para Hornos Incineradores. Recuperado de <http://nuevoportal.corantioquia.gov.co/Tematicas/Residuos%20Peligrosos/Protocolo%20requerimientos%20t%C3%A9cnicos%20y%20normativos%20para%20hornos%20incineradores.pdf> (Julio, 2014)
25. Dávalos, R. (2010). Diseño de una planta para el tratamiento de 20 000 barriles diarios de agua de formación en un campo maduro del oriente ecuatoriano. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico. Escuela Politécnica Nacional. Quito, España.
26. Davis, M. y Masten, S. (2005). Ingeniería y ciencias ambientales. (1ra. ed). México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A.
27. DDSS y OCADE. (2007). Gestión Integral de Residuos o desechos Peligrosos: Bases Conceptuales. Recuperado de http://frt.utn.edu.ar/posgrado/ambiental/Introducci_nResiduos.doc. (Febrero, 2014)
28. EMAAP-Q (2015). Pliego vigente tarifario. Recuperado de <http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/pliegotarifariovigentemayo2008.pdf> (Mayo, 2015)

29. EQQ (2015). Pliego vigente tarifario. Recuperado de <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/PLIEGO+TARIFARIO+FEBRERO+2014/b57671e8-911c-463a-9697-c395b1f21a33> (Mayo, 2015)
30. EPA. (1992). Method 1311: Toxicity Characteristics Leaching Procedure. Recuperado de <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>. (Febrero, 2014)
31. Escalante, J. (2002). Materiales Alternativos al cemento portland. Revista Avance y perspectiva, 21(1), 79-88.
32. Fernández, Y. (2010). Tratamiento Térmico Asistido con microondas en procesos de valoración energética. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Doctor en Ingeniería de Procesos y Ambiental (mención calidad)). Universidad de Oviedo. Oviedo, España.
33. Gpower, (2013). Estudio de Impacto y Plan de Manejo Ambiental: Centro de Tratamiento Integral “Shushufindi”, recuperado de http://maesucumbios.files.wordpress.com/2013/05/eia-borrador_final.pdf. (Febrero, 2014)
34. Grau, A. y Farré, O. (2011). Situación y Potencial de Valorización Energética Directa de Residuos: Estudio Técnico PER 2011-2020. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf (Julio, 2014)
35. Greenpeace Argentina. (2010). Nuevas Tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución. Recuperado de <http://noalaincineracion.org/wp-content/uploads/riesgos-tecnologias-residuos-urbanos.pdf> (Julio, 2014)

36. Guerra, G. (2013). Análisis de la viabilidad de un proyecto de Ingeniería Química. Recuperado de <http://simulacionblog.com/analisis-de-la-viabilidad-de-un-proyecto-de-ingenieria-quimica/> (Diciembre, 2014)
37. Gutiérrez, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. (2da. ed). Manizales, Colombia: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
38. Gutiérrez, G. Vicente, M. González, D. y Roche, L. (2002). Procedimiento de ensayo de compresión excéntrica en probetas de hormigón. Recuperado <http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1029/ES2195775A1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>: (Julio, 2015)
39. Herrera, A. y Madrid, G. (2010). Manual de Construcción de Mampostería de Concreto. Recuperado de <http://santafe-art.com/personal/Miguel%20gomez%20valencia/MANUAL%20ICPC%20%20MAMPOSTERIA.pdf> (Septiembre, 2014)
40. Hernández, J. (2010). Caracterización de puzolanas naturales para su uso como cementante en bloques compactados de arcilla. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Técnico Superior en Tecnología Ambiental). Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, México.
41. Ibañez, S. Gisbert, J. y Moreno, H. (2011). Tectosilicatos. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12887/Tectosilicatos.pdf?sequence=3> (Abril, 2015)
42. ICPA. (2011). Guía para el Control de Calidad de Hormigón aplicado a Pavimentos. Recuperado de http://www.icpa.org.ar/publico/files/guia_control_calidad.pdf (Abril, 2015)

43. IMECYC. (2007). Pavimentos: Pavimentos de concreto 2da parte. Revista construcción y tecnología en concreto, 226, 10-13.
44. INEN. (1987a). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines. Terminología y Clasificación. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1483.1987.pdf> (Diciembre, 2014)
45. INEN. (1987b). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines. Requisitos. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1488.1987.pdf> (Junio, 2014)
46. INEN. (2009). Norma Técnica Ecuatoriana: Cemento hidráulico. Determinación de la densidad. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0156.2009.pdf> (Junio, 2014)
47. INEN. (2010a). Norma Técnica Ecuatoriana: 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, 2014)
48. INEN. (2010b). 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.1578.2010.pdf> (Junio, 2014)
49. INEN. (2010c). Norma Técnica Ecuatoriana: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0858.2010.pdf> (Junio, 2014)
50. INEN. (2010d). 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, 2014)

51. INEN. (2011a). Norma Técnica Ecuatoriana: Hormigón de cemento portland. Ceniza volante o puzolana natural para el uso en el hormigón de cemento portland. Muestreo y ensayos. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1501.2011.pdf> (Junio, 2014)
52. INEN. (2011b). Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos para hormigón. Requisitos. Recuperado de <https://law.resource.org/ec/ibr/ec.nte.0872.2011.pdf> (Junio, 2014)
53. INEN. (2011c). Norma Técnica Ecuatoriana: Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0696.2011.pdf>(Junio, 2014)
54. INEN. (2011d). Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos para el hormigón. Determinación del contenido tola de humedad. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0862.2011.pdf> (Junio, 2014)
55. INEN. (2011e). 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, 2014)
56. INEN. (2011f). Norma Técnica Ecuatoriana: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2554.2011.pdf> (Junio, 2014)
57. INECYC. (2007). Manual de consejos prácticos sobre el hormigón. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/166352387/Pepe-Hormigon-Ocr-PDF> (Noviembre, 2014)
58. INECYC. (2009a). Notas técnicas: control de calidad en el hormigón. Recuperado de http://inecyc.org.ec/documentos/notas_tecnicas/CONTROL_CALIDAD_HORMIGON.pdf (Diciembre, 2014)

59. INECYC. (2009b). Notas técnicas: control de calidad en el hormigón parte II. Recuperado de http://inecyc.org.ec/documentos/notas_tecnicas/CONTROL_CALIDAD_HORMIGON_%20II.pdf (Diciembre, 2014)
60. INTI y CIRSOC. (2007). Reglamento Empírico para Construcciones de Mampostería de bajo Compromiso Estructural. Recuperado de <http://www.cormela.com.ar/docs/CIRSOC501E.pdf> (Agosto, 2014)
61. Jiménez P. García, A. y Morán, F. (2000). Hormigón Armado. (14va. ed.). Barcelona, España: Gustavo Gil, S.A.
62. Kaifer, J. (2006). Módulo de contaminación por residuos: Tratamientos Físico-químicos de residuos. Recuperado de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45774/componente45772.pdf (Abril, 2015)
63. Kuder, K. Lehman, D. Berman, J. Hannesson, G. y Shogren, R. (2012). Propiedades del hormigón fresco y endurecido. Revista Materiales de construcción, 41, 285-295. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.034
64. Kovier, K. y Roussel N (2011). Propiedades del hormigón fresco y endurecido. Cemento y hormigón de investigación, 41(7), 775-792. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.009
65. Lafarge. (2009). Guía práctica para fabricar hormigones de calidad. Recuperado de <http://www.lafarge.ec/guahormigon.pdf> (Noviembre, 2014)
66. LaGrega, M. Buckingham, P. y Evans, J. (1998). "GESTIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS: tratamiento, eliminación y recuperación de suelos". (2da, ed). Madrid: España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.
67. Lara, R. y Melgoza, R. (2009). Solidificación-estabilización de cromo, níquel y plomo en una matriz sólida de hormigón fabricada con cemento portland.

Revista Información Tecnológica, 23(1-2), 17-24.
doi:10.1612/inf.tecnol.4029it.08

68. Lee, H.K. Kim, H.K. y Heang, E.A. (2010). Utilización de las cenizas de fondo de una planta de energía en forma de agregados en el hormigón celular reforzado con fibra. *Revista gestión de residuos*, 30(2), 274-288
69. Lee, H.K. y Kim, H.K. (2011). Uso de cenizas de fondo de una planta de energía como agregado fino y grueso en el hormigón de alta resistencia. *Revista materiales de construcción*, 25(2), 1115-1122
70. Lema, A. y Chacón, J. (2012). Estudio comparativo de elementos fabricados de hormigón con material reciclado PET (Polietileno Tereftalato) y de hormigón convencional. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero civil). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
71. Lo, M, Tang, C, Li, X y Poon, C. (2012). Lixiviación y análisis microestructural de residuos estabilizados con cemento base. *Environmental Science and Technology*, 34(23), 5038-5042. doi:10.1021/es991224o CCC
72. Loayza, J. y Meza, M. (2009). Gestión intergal de residuos químicos generados en actividades industriales. *Revista de Química*, 20(1), 29-38. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/3452/3308> (Marzo 2015)
73. MAE. (2015). Acuerdo Ministerial No. 028: Sustituyese el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. Recuperado de <http://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/05/Libro-VI-Calidad-Ambiental.pdf> (Julio, 2015)
74. McCabe, E., Smith, j. y Harriot, P. (2007) Operaciones de ingeniería Química. (7ma. ed). México DF: Mc Graw Hill

75. Malvija, R. y Chaudhary, R. (2006). Factores que afectan a la estabilización/solidificación de residuos peligrosos: Una revisión. *Revista Materiales peligrosos*. 267-276. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.01.065
76. Martínez, J. (2005). Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos: Fichas Temáticas Tomo II. Recuperado de file:///C:/Users/REDU/Downloads/gestion_r02-fichas_tematicas.pdf (Julio, 2014)
77. MAVDT. (2007). Gestión integral de residuos o desechos peligrosos. Bases Conceptuales. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/221220639/4886-260210-Gestion-Integral-Respel-Bases-Conceptuales> (Agosto, 2014)
78. Metso. (2010). Catálogo Trituradoras de mandíbulas. Recuperado de http://www.matra.co.cr/contenido/descargables/mandibulas_serie_c.pdf (Diciembre, 2014)
79. Narváez, F. (2012). Utilización a nivel de laboratorios de los desechos de cerámica sanitaria generados en la fábrica Edesa para la fabricación de adoquines cerámicos. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
80. Nirich, S. (2006). Introducción a la Problemática de los residuos. Recuperado de http://frt.utn.edu.ar/posgrado/ambiental/Introducci_nResiduos.doc. (Febrero, 2014)
81. NRMCA. (2008). El concreto en la práctica: Qué, Por qué y Cómo. Recuperado de <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf> (Septiembre, 2014)
82. Onisei, S. Pontikes, Y. Van Gerven, T. Angelopoulos G, Velea, T, Predica, V. y Moldovan,P. (2012). Estabilización de cenizas y escorias de plomo a

partir de polímeros inorgánicos. *Diario de Materiales Peligrosos*, 205-206, 101-110. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.12.039

83. Ortega, F. y Ripani M. (2007). Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/38.pdf> (Noviembre, 2014)
84. Ortiz, E. y Tirado, R. (2005). Diseño y construcción de una trituradora de mandíbula de excéntrica elevada. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero mecánico). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
85. Ortiz, J. (2005). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Doctor en Ingeniería de la Construcción). Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya, España.
86. Pérez, E. (2014). Inertización de residuos radioactivos. 12vo Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid, España. Recuperado de <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711354.pdf> (Marzo, 2015)
87. PCR. (2012). Características de los mampuestos. Recuperado de <http://www.pcr.com.ar/assets/pdf-it/mampuestos.pdf> (Septiembre, 2014)
88. Proyecol. (2014). Equipos para la construcción e infraestructura. Recuperado de <http://www.proyecol.com/index.php/prefabricados/bloqueras-mecanicas-2> (Diciembre, 2014)

89. Ribeiro, A. y Mateus, E. Lima, A. García, A. Vereda, C. Gómez, C. Rodríguez, J.M y García, H. (2008). Cenizas Volantes de Incineradoras de Residuos Sólidos Urbanos: tratamientos y aplicaciones. *Revista Ingeniería Química*, 460(1), 110-122
90. Rivera, G. (2011). Concreto simple. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/190579105/Tecnologia-Concreto-y-Mortero-Rivera> (Abril, 2015).
91. Romo, M. (2006). Temas de hormigón armado. Recuperado de <http://publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigon/temas-de-hormigon-armado.htm> (Enero, 2015).
92. Rozumová, L. Motyka, O. Čabanová, K. y Seidlerová, J. (2015). Estabilización de cenizas de fondo generadas de la incineración de residuos peligrosos. *Revista Ingeniería química y ambiente*, 3(1), 1-9. doi:10.1016/j.jece.2014.11.006
93. Ruiz, R. Lorefice, R. Etse, G. y Santillán, C. (2012). Análisis mesomecánico del fenómeno de adherencia en estructuras de hormigón armado. *Revista Mecánica computacional*, 31(1), 1749-1766.
94. Santaella, L. y Salamanca R. (2004). Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (termopaipa IV) y agua constante. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 14(1), 1-7
95. Scanferla, L. (2009). Ensayos de hormigón en estado fresco y endurecido. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero civil). Universidad Tecnológica Nacional, La Plata, Argentina.
96. Secretaria de Ambiente. (2014). "Resolución 002-SA-2014: Norma Técnica Residuos Peligrosos correspondiente a la Ordenanza Metropolitana de Quito N° 0404". Quito, Ecuador.

97. Sigler, A. y bauder, J. (2012). "Educación en el agua de Pozo: Antimonio, Bario y Berilio". Recuperado de http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Antimony%20Barium%20Beryllium%202012-11-15-SP.pdf (Mayo, 2015)
98. SEDESOL. (2001). Manual Técnico-Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/tecnadmvo.html> (Julio, 2014)
99. Silva, Y. Robayo, R. Matthey, P. Delvasto, S. y Matthey P. (2014). Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35(1), 86-94.
100. TARNOS. (2008). Materiales Vibrantes: aplicaciones vibrantes. Recuperado de http://www.tarnos.com/espanol/catalogos/cribas_nrm.pdf (Diciembre, 2014)
101. Tchobanoglous, G. theisen, H. y Vigil, S. (1998). "GESTIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS: tratamiento, eliminación y recuperación de suelos". (2da, ed). Madrid: España: McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.
102. Valderrama, C. Torres J. y Mejía de Gutiérrez, R. (2011). Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de quemados. *Revista Ingeniería e Investigación*, 31(1), 39-46
103. Uyhunoğlu, T. Topcu, I. Gencil, O. y Brostow, W. (2012). Efecto del contenido de cenizas volantes y tipos de agregados en las propiedades de los bloque prefabricados de hormigón. *Revista Materiales de Construcción*, 30(1), 180-187.

ANEXOS

ANEXO I

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CENIZA

Los ensayos físicos realizados para esta etapa fueron tomados de la norma INEN 872: *Áridos para hormigón. Requisitos*. Estos ensayos se los realizó para caracterizar tanto áridos finos como áridos gruesos y se aplicaron a la ceniza debido a que en el presente trabajo se reemplazó parte del agregado fino por ceniza en la elaboración de las mezclas de hormigón (INEN, 2011b, p.8).

Tabla AI.1. Resultado del análisis granulométrico de ceniza de incineración de desechos sólidos

Tamiz Malla #	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
4	4 750	22,1	7,5	7,5	92,5
6	3 350	10,7	3,6	11,1	88,9
8	2 360	10,3	3,5	14,6	85,4
10	2 000	5,6	1,9	16,5	83,5
20	850	25,3	8,6	25,0	75,0
30	600	33,4	11,3	36,3	63,7
40	425	14,2	4,8	41,1	58,9
50	300	40,2	13,6	54,7	45,3
60	250	17,1	5,8	60,5	39,5
70	212	13,1	4,4	65,0	35,0
80	180	7,8	2,6	67,6	32,4
100	150	12,0	4,1	71,7	28,3
150	106	6,0	2,0	73,7	26,3
200	75	17,9	6,1	79,7	20,3
270	53	12,1	4,1	83,8	16,2

Tabla AI.1. Resultado del análisis granulométrico ceniza de incineración de desechos sólidos (continuación...)

Tamiz Malla #	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
325	45	5,5	1,9	85,7	14,3
400	38	2,7	0,9	86,6	13,4
<400	-	39,6	13,4	100,0	0,0
Total		295,6	100		

A partir de los datos obtenidos se elaboró la curva granulométrica de la ceniza la cual se encuentra representada en la Figura 3.2.

Obtenidos los valores de densidad real y aparente de la ceniza, se procedió a la determinación del porcentaje de vacíos de la ceniza aplicando la Ecuación 2.2

$$Vacíos = \frac{[(S \times M) - D_a]}{(S - D_a)} * 100$$

Donde:

M : masa unitaria (densidad aparente) de la ceniza, en kg/m^3

S : densidad real de la ceniza, en kg/m^3

D_a : densidad del agua, en kg/m^3

% Vacíos: espacio libre en la ceniza, %

Ejemplo de cálculo:

$$Vacíos = \frac{[(2\ 300 \times 900) - 1\ 000]}{(2\ 300 - 1\ 000)} * 100$$

$$Vacíos = 87,61 \%$$

La humedad contenida en la ceniza fue determinada por medio de las Ecuaciones 2.3 y 2.4 respectivamente y los datos experimentales obtenidos de tres replicas para el cálculo de esta propiedad se presentan en la Tabla AI.2:

$$\text{peso de agua} = P_2 - P_3$$

$$W = \frac{(P_2 - P_3)}{P_1} \times 100$$

Donde:

- P_1 : Peso de la muestra húmeda en g
 P_2 : Peso de la muestra húmeda + recipiente en g
 P_3 : Peso muestra seca + recipiente en g
 W : Contenido de humedad en %

Tabla AI.2. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis en el ensayo de humedad

Peso muestra húmeda (g)	Peso muestra húmeda + recipiente (g)	Peso muestra seca + recipiente (g)	Contenido de humedad (%)
20,3	55,5	51,8	18,23
20,1	51,2	47,7	17,41
20,2	57,1	53,9	15,84

Ejemplo de cálculo:

$$\text{peso agua} = 55,5 - 51,8 \text{ g}$$

$$\text{peso agua} = 3,7 \text{ g}$$

Contenido de humedad

$$W = \frac{3,7 \text{ g}}{20,3 \text{ g}} \times 100$$

$$W = 18,23 \%$$

Las cenizas volantes y puzolanas naturales deben cumplir con los requisitos en cuanto a composición química prescrito en la Tabla AI.3.

Tabla AI.3. Requerimientos químicos para cenizas volantes y puzolanas naturales bajo norma ASTM C618

Compuesto Volátil	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO_2) + óxido de aluminio (Al_2O_3) + óxido de hierro (Fe_2O_3), min, en (%)	70,0	70,0	50,0
Trióxido de azufre (SiO_3), min, (%)	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, máx.	3,0	3,0	3,0
Pérdida por ignición, máx., en (%)	10,0	6,0 ^A	6,0

(ASTM C 618, 2012, p. 2)

^A El uso de puzolana de la clase F que contiene hasta un 12,0 % en pérdida por ignición puede ser aprobado por el usuario, si bien los registros de desempeño son aceptables o los resultados de las pruebas de laboratorio se ponen a disposición.

ANEXO II

RESUMEN DE DATOS BIBLIOGRÁFICOS UTILIZADOS PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN POR EL MÉTODO ACI 211.1: STANDARD PRACTICE FOR SELECTING PROPORTIONS FOR NORMAL, HEAVYWEIGHT, AND MASS CONCRETE

Tabla AII.1.Asentamiento recomendado para varios tipos de construcción

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

(ACI 211.1, 2002, p.21)

Tabla AII.2.Tamaños máximos de agregados recomendados para varios tipos de construcción

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

(ACI 211.1, 2002, p.7)

Tabla AII.3. Cantidades aproximadas de agua de mezclado a partir de asentamientos y tamaños máximos de agregados seleccionados

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	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3	6
Cantidad de agua en dm ³ por m ³ de hormigón (hormigón sin inclusión de aire)								
7,6 -10,2	228	218	203	193	178	168	158	139
Cantidad de aire atrapado (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

(ACI 211.1, 2002, p8)

Si se requiere más agua que la indicada, el factor de cemento calculado con estas cantidades debe incrementarse proporcionalmente de modo de mantener la relación agua-cemento constante a menos que los ensayos de resistencia en laboratorio indiquen lo contrario.

Si se requiere menos agua que la indicada, el factor cemento calculado con estas cantidades no debe disminuirse a menos que los ensayos de resistencia en el laboratorio indiquen lo contrario (ACI, 2002, p.8).

Tabla AII.4. Relaciones agua-cemento máximas permisibles para la elaboración de adoquines

Tipo de estructura	Condiciones de exposición (1)					
	Fluctuaciones muy severas de temperatura o cambios frecuentes de congelación y deshielo (hormigón con inclusión de aire solamente)			Temperaturas moderadas rara vez bajo el punto de congelación o lluvioso o árido.		
	En el aire	A nivel del agua o dentro del rango de fluctuación del nivel de agua o humedecimiento		En el aire	A nivel del agua o dentro del rango de fluctuación del nivel de agua o humedecimiento	
		En agua dulce	En agua salada o con sulfatos (2)		En agua dulce	En agua salada o con sulfatos (2)
Bordillos, hormigón ornamental, pilotes, tuberías y todas las secciones con menos de 1 in de recubrimiento sobre el refuerzo	0,49	0,45	0,40 (3)	0,53	0,49	0,40 (3)

(ACI 211.1, 2002, p.10)

- (1) El hormigón con inclusión de aire debe utilizarse bajo todas las condiciones que contemplan exposición ambiental severa y puede utilizarse bajo condiciones de exposición moderadas para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.
- (2) Suelos o aguas freáticas que tengan concentraciones de sulfatos mayores a 0,2 %.

- (3) Cuando se utiliza cemento resistente a los sulfatos, relaciones agua-cemento máximas pueden incrementarse en 0,045 L/kg_{cemento}.
- (4) La relación agua-cemento debe seleccionarse sobre la base de las exigencias de resistencia y trabajabilidad.

Para este proyecto el hormigón elaborado no cumple con las características de los puntos (1), (2) y (3), consecuencia de esto se indicó que, la relación agua/cemento se escoge de acuerdo a las exigencias de la resistencia a la compresión, además, si el hormigón es elaborado con o sin inclusión de aire. Por lo tanto, empleando la Tabla AII.5 se seleccionó el valor de 0,623 para la relación agua/cemento para desarrollar en el hormigón una resistencia a la compresión de 210 kg/cm².

Tabla AII.5. Relación agua-cemento basada en la resistencia a la compresión seleccionada

Relación agua-cemento en peso (L/kg _{cemento})	Litros de agua por saco de cemento de 50 kg	Resistencia al a compresión a 28 días de curado (kg/cm ²)	
		Hormigón sin inclusión de aire	Hormigón con inclusión de aire
0,353	17,5	425	325
0,445	22,5	350	280
0,530	26,5	280	210
0,623	31,0	210	180
0,705	35,5	180	140
0,800	40,0	140	110

(ACI 211.1, 2002, p.22)

Tabla AII.6. Volumen aparente de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón* a partir del tamaño de partícula del agregado seleccionado y módulo de finura del agregado fino calculado

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

(ACI 211.1, 2002, p.12)

*Estos volúmenes se basan en agregados en condiciones secos y compactados

El valor del volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón se determinó empleando la Tabla AII.6, utilizando los valores de módulo de finura del agregado fino y el tamaño máximo del agregado a usar equivalente a 640 dm³.

ANEXO III

FOTOGRAFÍAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y CON CENIZA

- ENSAYOS EN ESTADO FRESCO



Figura AIII.1. Ensayo de asentamiento del hormigón convencional y con ceniza utilizando el cono de Abrams



Figura AIII.2. Ensayo contenido de aire del hormigón convencional y con ceniza

- ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO



Figura AIII.3. Ensayo de resistencia a la compresión aplicado a una probeta cilíndrica de hormigón convencional y con ceniza



Figura AIII.4. Ensayo de módulo de elasticidad del hormigón convencional y con ceniza



Figura AIII.5. Ensayo de tracción indirecta del hormigón convencional y con ceniza



Figura AIII.6. Ensayo de resistencia a la flexión del hormigón convencional y con ceniza, utilizando una viga simple con carga en los tercios



Figura AIII.7. Ensayo de adherencia del hormigón convencional y con ceniza



Figura AIII.8. Ensayo de velocidad sónica del hormigón convencional y con ceniza



Figura AIII.9. Ensayo de peso específico y absorción de agua del hormigón convencional y con ceniza: a) masa de la probeta después del secado, b) masa de la probeta después del secado y de la inmersión, c) masa de la probeta después de la ebullición, d) masa de la probeta suspendida en agua

ANEXO IV

RESUMEN DEL CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN PARA ELABORAR 1 m³ DE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y CON CENIZA

Para el cálculo de la dosificación de mezcla de hormigón se utiliza la información de la Tabla 3.2.

- **PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO FINO**

Para determinar las propiedades de densidad real y absorción de agua se emplearon las Ecuaciones AIV.1 y AIV.2:

$$D_f = \frac{S}{B+S-C} * \rho \quad \text{[AIV.1]}$$

$$Ab = \frac{S-A}{A} x 10 \quad \text{[AIV.2]}$$

Donde:

- S*: Peso de muestra saturada superficialmente seca (S.S.S), en g
- B*: Peso del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de aforo, en g
- C*: Peso del picnómetro con agua y muestra hasta la marca de aforo, en g
- ρ : Densidad del agua a 23 °C, en g/cm³
- D_f*: Densidad del agregado fino en condición saturada superficialmente seca, en g/cm³
- A*: Peso de la muestra seca en horno, en g
- Ab_f*: Absorción de agua, en porcentaje

Mediante los datos obtenidos en la Tabla AIV.1 se procedió a efectuar el cálculo de las propiedades antes mencionadas.

Tabla AIV.1. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de densidad y absorción de agua del agregado fino

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de la muestra seca al horno (A)	443,3	g
Peso del picnómetro lleno con agua (B)	714,5	g
Peso picnómetro + agua + arena (C)	998,5	g
Peso muestra SSS (S)	500,0	g

Ejemplo de cálculo:

$$D_f = \frac{500,0}{714,5 + 500,0 - 998,5} * 0,9975$$

$$D_f = 2,31 \text{ g/cm}^3$$

$$Ab_f = \frac{500,0 - 443,3}{443,3} * 100$$

$$Ab = 12,79\%$$

Para la determinación de masa unitaria (densidad aparente) suelta y compactada se utilizaron los datos de la Tabla AIV.2 y su cálculo mediante la Ecuación [AIV.3].

Tabla AIV.2. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de masa unitaria del agregado fino

Parámetro	Valor	Unidad
Altura del molde (h)	29,1	cm
Diámetro del molde (d)	20,1	cm
Volumen del molde (V)	9 233,7	cm ³
Masa del molde (m)	4 818,0	g
Peso muestra suelta + molde (M ₁)	20 210,0	g
Peso muestra compactada + molde (M ₂)	21 790,0	g

$$M_s = \frac{M_1 - m}{V}$$

[AIV.3]

Donde:

M_s : Peso de la muestra seca en horno, en g

M_1 : Peso del molde con la muestra suelta, en g

m : Peso del molde, en g

V : Volumen del molde, en cm^3

Ejemplo de cálculo:

$$M_{sf} = \frac{20\,210,0 - 4\,818,0\text{ g}}{9\,233,7\text{ cm}^3}$$

$$M_{sf} = 1,67 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$M_{cf} = 1,84 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Para la determinar el d_{80} del agregado fino se realizó la curva de granulometría con valores máximos y mínimos de la norma INEN 696: *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Los resultados del proceso de tamizado de la muestra se presentan en la Tabla AIV.3 y la curva de granulometría graficada en la Figura 3.3. Mientras que, el módulo de finura se lo determinó mediante la Ecuación AIV.4 (p.7).

$$M.F = \frac{\sum \text{Retenidos acumulados de los tamices serie de finura hasta el \#100}}{100} \quad [\text{AIV.4}]$$

Ejemplo de cálculo

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

$$M.F = 3,0$$

Donde:

M.F: módulo de finura, número adimensional

Tabla AIV.3. Análisis granulométrico del agregado fino

Tamiz	Abertura (mm)	Retenido acumulado (%)	Material que pasa (%)	Min	Max
3/8	9,500	0,00	100,00	100	100
4	4,750	4,95	95,05	95	100
8	2,360	20,28	79,72	80	100
16	1,180	40,68	59,32	50	85
30	0,600	59,17	40,83	25	60
50	0,300	77,12	22,88	10	30
100	0,150	93,16	6,84	2	10
200	0,075	98,15	1,85	0	5
Total		100,00	0,00		

De la curva de granulometría presentada en la Figura 3.3 se obtuvo el valor del d_{80} correspondiente a 2,36 mm.

- **PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO**

Para la determinación de la densidad real y el porcentaje de absorción de agua del agregado grueso se emplearon las Ecuaciones AIV.4 y AIV.5:

$$D_g = \frac{B}{B-C} * \rho \quad \text{[AIV.4]}$$

$$Ab_g = \frac{B-A}{A} x 10 \quad \text{[AIV.5]}$$

Donde:

B: Peso de muestra saturada superficialmente seca, en g

C: Peso de la muestra aparente en agua, en g

- A: Peso de la muestra seca en horno, en g
 ρ : Densidad del agua a 23 (°C)
 D_g : Densidad del agregado fino en condición saturada superficialmente seca, en g/cm³
 Ab_g : Absorción de agua, en porcentaje

Mediante los datos obtenidos en la Tabla AIV.4 se procedió a efectuar el cálculo de las propiedades antes mencionadas.

Tabla AIV.4. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de densidad y absorción de agua del agregado grueso

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de la muestra seca al horno (A)	2 873,8	g
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (B)	3 001,2	g
Masa de muestra aparente en agua (C)	1 817,5	g

$$D_g = \frac{3\,001,2}{3\,001,2 - 1\,817,5} * 0,9975$$

$$D_g = 2,54 \frac{g}{cm^3}$$

$$Ab_g = \frac{3\,001,2 - 2\,873,8}{2\,873,8} * 100$$

$$Ab_g = 4,43 \%$$

Para la determinación de masa unitaria (densidad aparente) suelta y compactada del agregado grueso se empleó la Ecuación AIV.6

$$M_{sg} = \frac{M_1 - m}{V} \quad [AIV.6]$$

Donde:

M_{sg} : peso de la muestra seca en horno (g)

M_1 : peso del molde con la muestra suelta (g)

m : peso del molde (g)

V : volumen del molde (cm^3)

Utilizando los datos de la Tabla AIV.5 se efectuó el cálculo de la masa unitaria de suelta y compactada de la muestra de agregado grueso.

Tabla AIV.5. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de masa unitaria del agregado grueso

Parámetro	Valor	Unidad
Altura del molde (h)	27,8	cm
Diámetro del molde (d)	25,3	cm
Volumen del molde (V)	13 975,8	cm^3
Peso del molde (m)	5 468,0	g
Peso muestra suelta + molde (M_1)	25 195,0	g
Peso muestra compactada (M_2)	26 128,0	g

Ejemplo de cálculo:

$$M_{sg} = \frac{25\,195,0 - 5\,468,0\,g}{13\,975,8\,cm^3}$$

$$M_{sg} = 1,41 \frac{g}{cm^3}$$

$$M_{cg} = 1,49 \frac{g}{cm^3}$$

De la Tabla AIV.6 se puede observar que el tamaño máximo nominal (es el mayor tamaño del tamiz, listado en la norma aplicable, sobre el cual se permite la retención de cualquier material) del agregado grueso es de 1 pulgada (Rivera, 2011, p.60).

Tabla AIV.6. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis granulométrico del agregado grueso

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Material que pasa (%)
1 1/2	38,10	0,0	0,0	0,0	100,0
1	25,40	348,2	3,4	3,4	96,52
3/4	19,10	1 342,7	13,4	16,9	83,09
1/2	12,70	2 623,6	26,2	43,1	56,86
3/8	9,50	1 053,9	15,0	58,1	41,82
#4	4,75	3 206,0	32,0	90,2	9,76
Bandeja		976,3	9,7	100,0	0,0
Total		10 000,0	100,0		

• PROPIEDADES DEL CEMENTO

Entre las propiedades determinadas para el cemento se encuentran la densidad real y masa unitaria (densidad aparente) suelta y compactada. De ahí que, para la densidad real se empleó la Ecuación AIV.7 aplicando el método de Le Chatelier como se indica en la Norma INEN 0156: *Cemento hidráulico. Determinación de la densidad*.

El método consiste en usar un frasco Le Chatelier el cual está graduado para mediciones volumétricas como se indica en la Figura AIV.1.

Se colocó una determinada cantidad de reactivo en el frasco, de tal manera que no pase del cuello inferior (entre 0 y 1 cm³).

Se determinó el volumen (V₁) y el peso del frasco con cemento (P₁), se registraron estos valores.

Se introdujo la muestra de cemento en el frasco, con la ayuda de una espátula, hasta que el nivel del reactivo esté en el cuello superior entre 18 y 24 cm³. Se tapó el frasco y se agitó rotacionalmente para extraer el aire atrapado en el cemento y se dejó reposar.

Finalmente se anotó la lectura de volumen (V_2) y el peso del frasco con reactivo y cemento (P_2). Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla AIV.7. Cabe aclarar que el líquido utilizado en este método es la gasolina con base en que si se usa agua iniciaría la hidratación de éste (INEN, 2009, pp. 1-3).

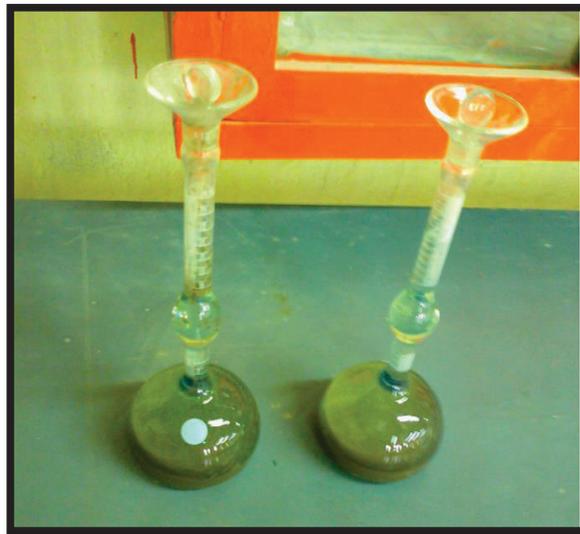


Figura AIV.1. Frasco Le Chatelier utilizado en la determinación de la densidad del cemento

$$D_c = \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} \times 100 \quad \text{[AIV.7]}$$

Donde:

- D_c : Densidad real del cemento, en g/cm³
- P_1 : Peso de la muestra hasta la primera muesca, en g
- P_2 : Peso de la muestra hasta la segunda muesca, en g
- V_1 : Volumen del fluido hasta la primera muesca, en cm³

V_2 : Volumen del fluido hasta la segunda muesca, en cm^3

Tabla AIV.7. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de la densidad del cemento

Parámetro	Valor	Unidad
Peso de la muestra hasta la primera muesca (P_1)	328,6	g
Peso de la muestra hasta la segunda muesca (P_2)	387,1	g
Volumen del fluido hasta la primera muesca (V_1)	0,6	cm^3
Volumen del fluido hasta la segunda muesca (V_2)	21,2	cm^3

Ejemplo de cálculo:

$$D_c = \frac{387,1 - 328,6}{21,2 - 0,6}$$

$$D_c = 2,84 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

La Ecuación empleada para la determinación de masa unitaria del cemento fue la AIV.8.

$$M_{sc} = \frac{M_1 - m}{V} \quad [\text{AIV.8}]$$

Donde:

- M_{sc} : Peso de la muestra seca en horno (g)
- M_1 : Peso del molde con la muestra suelta (g)
- m : Peso del molde (g)
- V : Volumen del molde (cm^3)

Utilizando los datos experimentales de la Tabla AIV.8 se calculó la masa unitaria (densidad aparente).

Ejemplo de cálculo:

$$M_{sc} = \frac{471,1 - 158,0}{298,2}$$

$$M_{sc} = 1,05 \frac{g}{cm^3}$$

$$M_{cc} = 1,32 \frac{g}{cm^3}$$

Tabla AIV.8. Datos obtenidos experimentalmente en el análisis de masa unitaria suelta y compactada del agregado grueso

Parámetro	Valor	Unidad
Altura del molde (h)	14,6	cm
Diámetro del molde (d)	5,1	cm
Volumen del molde (V)	298,2	cm ³
Masa del molde (m)	158,0	g
Peso muestra suelta + molde (M ₁)	471,1	g
Peso muestra compactada (M ₂)	552,0	g

- **DOSIFICACIÓN**

La dosificación elaborada inicialmente, fue la mezcla de hormigón convencional utilizando los parámetros presentados en la Tabla AIV.9. Cada uno de los parámetros presentados se seleccionó siguiendo la metodología descrita en la Sección 2.2 usando las Tablas AII.1, AII.2, AII.3, AII.5 y AII.6 correspondientes al Anexo II.

Tabla AIV.9. Variables de control para el diseño de la dosificación del hormigón convencional

Parámetro	Valor	Unidad
Tamaño máximo de agregado grueso	1	in
Asentamiento	7,6 – 10,2	cm
Resistencia a la compresión	210	g/cm ²
Cantidad de agua	193	dm ³
Relación agua cemento (A/C)	0,623	L _{agua} /kg cemento
Contenido de aire atrapado	1,5	%
Volumen de agregado grueso	640	dm ³

A continuación se realizó el cálculo en peso de cada una de las materias primas, mediante las Ecuaciones AIV.9, AIV.10, AIV.11 y AIV.12:

$$\text{Peso de agua} = \frac{\text{dm}^3 \text{ de agua}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} \quad [\text{AIV.9}]$$

$$\text{Peso de agua} = \frac{193 \text{ dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} * \frac{1\text{L}}{1\text{dm}^3} * \frac{10^{-3}\text{m}^3}{1\text{L}} * \frac{1\ 000\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Peso de agua} = 193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$$

Una vez obtenida la cantidad de agua necesaria en peso, se partió de la relación agua/cemento, Ecuación AIV.10, para determinar la cantidad de cemento en la mezcla.

$$\frac{A}{C} = 0,623 \quad [\text{AIV.10}]$$

$$\text{Peso de cemento} = \frac{193 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}}{0,623 \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}_{\text{cemento}}}}$$

$$\text{Peso de cemento} = 309,8 \frac{\text{kg}_{\text{cemento}}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$$

Se determinó el volumen que representa el cemento en la mezcla a partir de la ecuación AIV.11.

$$V_C = P_C / \rho_C \quad [\text{AIV.11}]$$

Donde:

V_C : volumen de cemento en la mezcla de hormigón, en $\frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$

ρ_C : densidad del cemento, en $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$

P_C : peso de cemento, en $\frac{\text{kg}_{\text{cemento}}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$

$$\text{Volumen de cemento} = 309,8 \frac{\text{kg}_{\text{cemento}}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} * \frac{\text{dm}^3}{2,84 \text{ kg}_{\text{cemento}}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = 109,3 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$$

La cantidad de agregado grueso seleccionado de la Tabla AI.6 a partir del tamaño de partícula y módulo de finura del agregado fino representa un volumen aparente, para el cálculo del volumen real se aplica la ecuación AIV.12.

$$V_g = V_s * \frac{M_{cg}}{D_g} \quad [\text{AIV.12}]$$

Donde:

V_g : volumen real de agregado grueso en la mezcla, en $\frac{\text{dm}^3 \text{ reales}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$

V_s : volumen aparente seleccionado, en $\frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$

M_{cg} : densidad aparente compactada, en $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

D_g : densidad real del agregado, en $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

$$\text{Volumen de agregado grueso} = \frac{640 \text{ dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}} * \frac{1,49 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{2,54 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$\text{Volumen de agregado grueso} = 375 \frac{\text{dm}^3 \text{ reales}}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$$

Para determinar el volumen de agregado fino en la mezcla se empleó la Ecuación AIV.13:

$$V_f = V_{\text{Thormigón}} - V_g - V_{\text{agua}} - V_{\text{aire}} - V_c \quad [\text{AIV.13}]$$

Donde:

V_f : Volumen de agregado fino, en $\frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3 \text{ de hormigón}}$

$$V_{Thormigón}: \text{ Volumen total de mezcla de hormigón, en } \frac{dm^3}{m^3 \text{ de hormigón}}$$

$$V_g: \text{ Volumen de agregado grueso, } \frac{dm^3}{m^3 \text{ de hormigón}}$$

$$V_{agua}: \text{ Volumen de agua, } \frac{dm^3}{m^3 \text{ de hormigón}}$$

$$V_c: \text{ Volumen de cemento, } \frac{dm^3}{m^3 \text{ de hormigón}}$$

Ejemplo de cálculo:

$$V_f = 1\,000,0 - 375,0 - 193,0 - 15,0 - 109,3$$

$$V_f = 307,7 \frac{dm^3}{m^3 \text{ de hormigón}}$$

Para tener los valores en peso se procedió a realizar la conversión utilizando la densidad de cada una de las materias primas y los resultados se presentan en la Tabla 3.6 correspondiente a la Sección 3.2.

Los pesos antes mencionados corresponden a la mezcla de hormigón convencional, y para determinar las mezclas de hormigón con ceniza se procedió a reemplazar la cantidad agregado fino en peso para cada uno de los porcentajes de ceniza como se indican en la Tabla 3.7.

ANEXO V

RESUMEN DEL CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

- RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Para el cálculo de la resistencia a la compresión se partieron de las variables que se presentan en la Tabla AV.1.

Tabla AV.1. Variables para el cálculo de la resistencia a la compresión hormigón convencional a 28 días de curado

Parámetro	Valor	Unidad
Carga	36,33	t
Diámetro del cilindro	15,00	cm
Altura del cilindro	30,00	cm

A continuación se presenta la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón convencional a 28 días de curado de un promedio de tres repeticiones de este ensayo mediante la Ecuación 2.5:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde:

$f'c$: resistencia a la compresión, en (kg/cm²)

P : carga máxima aplicada (t)

A : área superficial del cilindro (cm²)

Ejemplo de cálculo:

$$f'c = \frac{36,88 \text{ t} * \frac{1000 \text{ kgf}}{\text{t}}}{\frac{15^2 \text{ cm}^2}{4} * \pi}$$

$$f'c = 208,74 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

- **MÓDULO DE ELASTICIDAD**

Para el cálculo de la resistencia a la compresión se partió de las variables que se presentan en la Tabla AV.2.

Tabla AV.2. Datos para elaborar curva de carga vs deformación para el hormigón convencional a 28 días de curado

Carga (kgf)	Deformación (um/um)
0	0
500	10
1 000	30
1 500	40
2 000	60
2 500	80
3 000	100
3 500	120
4 000	140
4 500	160
5 000	180
6 000	220
7 000	260
8 000	300
9 000	350
10 000	390
12 000	480
14 000	600

Tabla AV.2. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón convencional a 28 días de curado (continuación...)

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
16 000	720
18 000	860
20 000	1 020
22 000	1 190
24 000	1 390
26 000	1 690
28 000	2 030
30 000	2 690

A partir de los datos obtenidos en la Tabla AV.2, se procedió a graficar la curva característica de deformación para el hormigón convencional presentada en la Figura AV.1. Se trazó la pendiente de la parte lineal de la curva y se procedió a calcular el módulo de elasticidad mediante la Ecuación AV.1:

$$E_c = \frac{\Delta f'c}{\Delta \epsilon} \quad [AIV.1]$$

Donde:

E_c : módulo de elasticidad (GPa)

$\Delta f'c$: resistencia a la compresión (kg/cm²)

$\Delta \epsilon$: deformación (um/um)

Ejemplo de cálculo:

$$E_c = \frac{8\,000 - 3\,000}{0,030 - 0,010}$$

$$E_c = 250\,000 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} * \frac{1 \text{ GPa}}{10\,197,16 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}$$

$$E_c = 24,52 \text{ GPa}$$

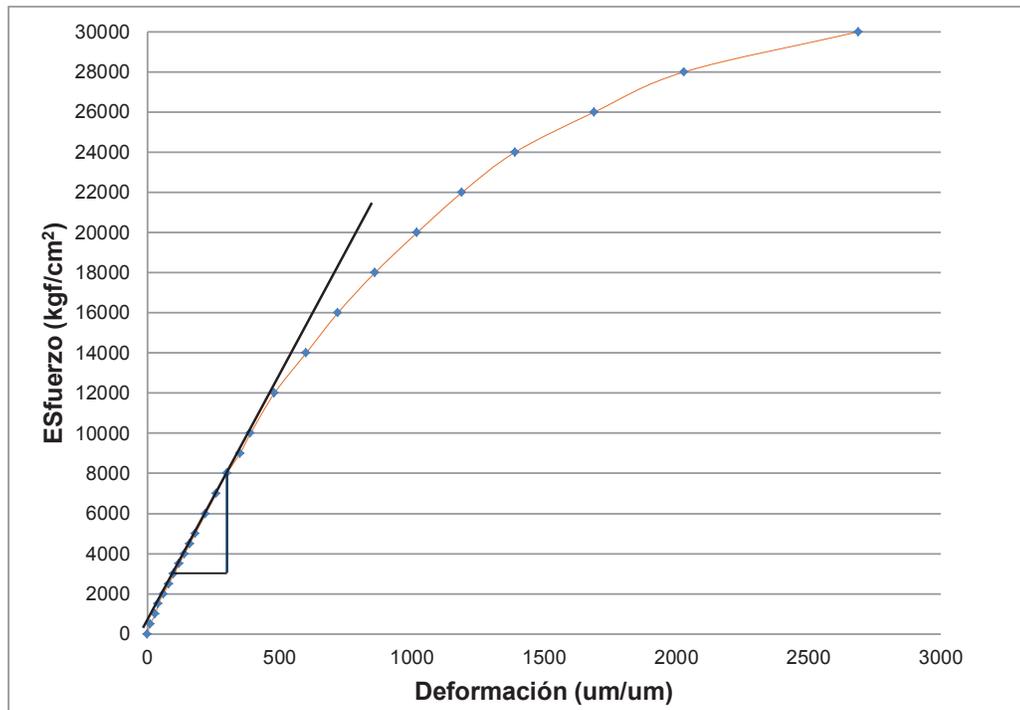


Figura AV.1. Curva deformación vs carga hormigón convencional a 28 días de curado

- **RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA**

Para el cálculo de la propiedad de tracción indirecta se utilizaron las variables presentadas en la Tabla AV.3.

A continuación se presenta la determinación de la resistencia a la tracción indirecta del hormigón convencional a 28 días de curado de un promedio de tres repeticiones de este ensayo mediante la Ecuación 2.6:

Tabla AV.3. Variables para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta del hormigón convencional a 28 días de curado

Parámetro	Valor	Unidad
Carga máxima aplicada	16,73	t
Longitud del cilindro	30,00	cm
Diámetro del cilindro	15,00	cm

$$ft = \frac{2P}{\pi LD}$$

Donde:

ft : resistencia a la tracción indirecta (kg/cm^2)

P : carga máxima aplicada (kg/cm^2)

L : longitud del cilindro (cm)

D : diámetro del cilindro (cm)

Ejemplo de cálculo:

$$ft = \frac{16,73 \text{ t} * \frac{1000 \text{ kg}}{\text{t}} * 2}{15,00 \text{ cm} * 30,00 \text{ cm} * \pi}$$

$$ft = 23,66 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

- **RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

Para el cálculo del módulo de rotura se partieron de las variables que se presentan en la Tabla AV.4:

A continuación se presenta la determinación del módulo de rotura del hormigón convencional a 28 días de curado de un promedio de tres repeticiones de este ensayo mediante la siguiente Ecuación 2.7.

Tabla AV.4. Variables para el cálculo del módulo de rotura del hormigón convencional a 28 días de curado

Parámetro	Valor	Unidad
Carga máxima aplicada	2,60	t
Luz libre de apoyos	50	cm
Ancho de viga	15	cm
Altura de la viga	15	cm

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

- MR*: módulo de rotura (kg/cm²)
P: carga máxima aplicada (t)
L: luz libre entre apoyos (cm)
b: ancho de la viga (cm)
d: altura de la viga (cm)

Ejemplo de cálculo:

$$MR = \frac{2,60 \text{ t} * \frac{1000 \text{ kg}}{\text{t}} * 50 \text{ cm}}{15 \text{ cm} * 15^2 \text{ cm}^2}$$

$$MR = 38,47 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

- **ADHERENCIA**

En la Tabla AV.5 se presentan las variables utilizadas en el cálculo de la adherencia.

Una vez obtenida la resistencia específica a la tracción (f_s), se calculó la resistencia nominal de tracción mediante la Ecuación 2.8.

$$N = f_s * A_s$$

Tabla AV.5. Variables para el cálculo de la adherencia del hormigón convencional a 28 días de curado

Parámetro	Valor	Unidad
Esfuerzo a desarrollarse en el acero	2 441,56	kg/cm ²
Área superficial de la barra	1,33	cm ²
Longitud de la barra embebida	21,00	cm
Diámetro de la barra	1,30	cm

Se determinó el esfuerzo de adherencia del hormigón convencional a 28 días de curado de un promedio de tres repeticiones de este ensayo mediante la Ecuación 2.9.

$$\mu = \frac{N}{\pi L \phi}$$

Donde:

- N : resistencia nominal de tracción (kg/cm²)
- f_s : resistencia específica a la tracción (kg/cm²)
- A_s : área superficial de la barra, (cm²)
- μ : esfuerzo de adherencia (kg/cm²)
- L : longitud de la barra que penetra el concreto (cm)
- ϕ : diámetro de la barra (cm)

Ejemplo de cálculo:

$$N = 2\,441,56 \frac{kg}{cm^2} * 1,33 cm^2$$

$$N = 3\,240,65 kg$$

$$\mu = \frac{3\,240,65 kg}{\pi * 21,37 cm * 1,30 cm}$$

$$\mu = 37,14 \frac{kgf}{cm^2}$$

- **VELOCIDAD SÓNICA**

Se presenta la determinación de la velocidad sónica del hormigón convencional a 28 días de curado de un promedio de tres repeticiones de este ensayo mediante la Ecuación 2.10.

$$V_s = \frac{L_s}{T_s}$$

Donde:

V_s : velocidad sónica (m/s)

L_s : distancia recorrida por el pulso (m)

T_s : tiempo efectivo del pulso (s)

Ejemplo de cálculo:

$$V_s = \frac{30cm * \frac{1m}{100 cm}}{77,7 us * \frac{1s}{10^{-6}us}}$$

$$V_s = 3861 \frac{m}{s}$$

- **PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN**

Para la determinación del peso específico, porcentaje de porosidad y porcentaje de absorción de agua se utilizaron las variables que se presentes en la Tabla AV.6.

A continuación se presenta la determinación valores de densidad (seca, superficialmente seca o después de la inmersión, después de la inmersión y ebullición) mediante las Ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13, para la absorción y volumen de poros se utilizó las Ecuaciones 2.14 y 2.15 respectivamente.

Tabla AV.6. Variables para el cálculo del peso específico, porcentaje de porosidad y porcentaje de absorción de agua del hormigón convencional a 28 días de curado

Parámetro	Valor	Unidad
Peso muestra seca al horno (A)	12 195,00	g
Peso muestra después de inmersión (B)	12 262,17	g
Peso muestra después de inmersión y ebullición (C)	12 094,77	g
Peso aparente de muestra en agua (D)	6 774,00	g
Densidad del agua	1,00	g/cm ³

$$g_1 = \left[\frac{A}{C-D} \right] * \rho$$

$$g_2 = \left[\frac{B}{C-D} \right] * \rho$$

$$g_3 = \left[\frac{C}{C-D} \right] * \rho$$

$$A_b = \left[\frac{C-A}{A} \right] * 100$$

$$Vp = \left[\frac{C-A}{C-D} \right] * 100$$

Donde:

- A: masa de la muestra secada al horno (g)
- B: masa de la muestra saturada y seca superficialmente en el aire después de la inmersión (g)
- C: masa de la muestra seca superficialmente en aire después de la ebullición (g)

D : masa aparente de la muestra en agua después de la inmersión y ebullición (g)

g_1 : densidad específica seca (g/cm^3)

g_2 : densidad específica S.S.S (g/cm^3)

g_3 : densidad específica después de inmersión y de ebullición (g/cm^3)

V_p : porosidad (%)

Ab : absorción de agua (%)

ρ : densidad del agua (g/m^3)

Ejemplo de cálculo:

$$g_1 = \left[\frac{12\,195,00\text{ g}}{12\,094,77 - 6\,774,00} \right] * 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$g_1 = 2,295 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$g_2 = \left[\frac{12\,262,17}{12\,094,77 - 6\,774,00} \right] * 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$g_2 = 2,308 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$g_3 = \left[\frac{12\,094,77}{12\,094,77 - 6\,774,00} \right] * 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$g_3 = 2,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$Ab = \left[\frac{12\,094,77 - 12\,195,00}{12\,195,00} \right] * 100$$

$$Ab = 0,822 \%$$

$$Vp = \left[\frac{12\,094,77 - 12\,195,00}{12\,094,77 - 6\,774,00} \right] * 100$$

$$Vp = 1,895 \%$$

ANEXO VI

RESUMEN DE RESULTADOS DE PROMEDIOS DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL Y CON CENIZA

- **ASENTAMIENTO**

Tabla AVI.1. Resultados de valores promedio para el asentamiento del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Asentamiento (cm)				
	HC	C30	C25	C20	C15
1	8,4	7,0	6,4	7,0	7,3
2	8,4	6,5	7,4	7,8	7,5
3	8,5	6,0	8,2	8,1	8,6
Promedio	8,4	6,5	7,3	7,6	7,8

- **TEMPERATURA**

Tabla AVI.2. Resultados de valores promedio para la temperatura del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Temperatura (°C)				
	HC	C30	C25	C20	C15
1	18,0	16,5	16,0	17,0	15,0
2	20,0	17,2	16,0	17,0	15,0
3	21,0	17,0	17,5	17,0	16,0
Promedio	19,6	16,9	16,5	17,0	15,3

- **CONTENIDO DE AIRE**

Tabla AVI.3. Resultados de valores promedio para el contenido de aire del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Contenido de aire (%)				
	HC	C30	C25	C20	C15
1	1,5	2,0	1,7	1,7	1,6
2	1,5	1,6	1,8	1,7	1,7
3	1,5	1,8	1,8	1,7	1,7
Promedio	1,5	1,8	1,8	1,7	1,6

- **RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Tabla AVI.4. Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón convencional a diferentes días de curado

Días	3	7	14	28
Ensayo	Resistencia (kg/cm ²)			
1	73,96	133,21	188,84	208,58
2	81,26	133,38	192,57	211,64
3	70,62	130,83	189,68	206,00
Promedio	75,28	132,47	190,36	208,74

Tabla AVI.5. Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 15 % de ceniza a diferentes días de curado

Días	3	7	14	28
Ensayo	Resistencia (kg/cm ²)			
1	89,98	136,72	182,27	203,38
2	97,39	137,74	189,97	205,53
3	87,43	140,23	186,01	199,47
Promedio	91,60	138,23	186,08	202,79

Tabla AVI.6. Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 20 % de ceniza a diferentes días de curado

Días	3	7	14	28
Ensayo	Resistencia (kg/cm²)			
1	78,43	123,87	170,27	177,74
2	82,22	128,12	167,73	185,72
3	83,13	124,95	170,78	184,36
Promedio	81,26	125,64	169,60	182,61

Tabla AVI.7. Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 25 % de ceniza a diferentes días de curado

Días	3	7	14	28
Ensayo	Resistencia (kg/cm²)			
1	75,60	109,27	122,97	135,93
2	76,68	105,42	113,74	144,98
3	81,03	105,65	121,27	152,17
Promedio	77,77	106,78	119,32	144,36

Tabla AVI.8. Resultados para el valor promedio del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón con 30 % de ceniza a diferentes días de curado

Días	3	7	14	28
Ensayo	Resistencia (kg/cm²)			
1	68,42	97,95	108,82	130,21
2	70,17	98,01	112,33	137,11
3	76,39	106,27	113,40	145,55
Promedio	71,66	100,75	111,52	137,62

- **MÓDULO DE ELASTICIDAD**

Tabla AVI.9. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón convencional a 28 días de curado

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
0	0
500	10
1 000	30
1 500	40
2 000	60
2 500	80
3 000	100
3 500	120
4 000	140
4 500	160
5 000	180
6 000	220
7 000	260
8 000	300
9 000	350
1 000	390
12 000	480
14 000	600
16 000	720
18 000	860
20 000	1 020
22 000	1 190
24 000	1 390
26 000	1 690
28 000	2 030
30 000	2 690

Tabla AVI.10. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón con 15% de ceniza a 28 días de curado

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
0	0
500	10
1 000	25
1 500	40
2 000	60
2 500	70
3 000	80
3 500	90
4 000	110
4 500	120
5 000	140
6 000	160
7 000	190
8 000	220
9 000	250
10 000	280
12 000	330
16 000	450
18 000	520
20 000	600
22 000	670
24 000	740
26 000	830
28 000	990
30 000	1 270
32 000	1 750
34 000	2 220
36 000	3 210

Tabla AVI.11. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón con 20 % de ceniza a 28 días de curado

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
0	0
500	10
1 000	20
1 500	30
2 000	50
2 500	70
3 000	90
3 500	110
4 000	130
4 500	150
5 000	170
6 000	210
7 000	260
8 000	310
9 000	360
10 000	420
12 000	530
14 000	700
16 000	900
18 000	1 130

Tabla AVI.12. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón con 25 % de ceniza a 28 días de curado

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
0	0
500	20
1 000	40
1 500	60
2 000	90
2 500	110

Tabla AVI.12. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón con 25 % de ceniza a 28 días de curado (continuación...)

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
3 000	140
3 500	170
4 000	190
4 500	220
5 000	240
6 000	340
7 000	400
8 000	450
16 000	860
20 000	950
22 000	1 210
24 000	1 680

Tabla AVI.13. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón con 30% de ceniza a 28 días de curado

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
0	0
5 00	20
1 000	50
1 500	70
2 000	90
2 500	110
3 000	140
3 500	170
4 000	190
4 500	220
5 000	250
6 000	310
7 000	360
8 000	450

Tabla AVI.13. Datos para elaborar curva de esfuerzo - deformación para el hormigón con 30% de ceniza a 28 días de curado (continuación...)

Esfuerzo (kg/cm²)	Deformación (um/um)
16 000	860
18 000	930
20 000	1 210
24 000	1 680

- **RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

Tabla AVI.14. Resultados para el valor promedio del módulo de rotura del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado

Módulo de rotura (kg/cm²)					
Ensayo	Tipo de hormigón				
	Convencional	C 30	C 25	C 20	HC 15
1	47,70	23,85	25,68	27,15	32,28
2	26,07	24,00	25,92	27,39	32,40
3	41,63	24,30	25,80	27,75	34,80
Promedio	38,47	24,05	25,80	27,43	33,16

HC: hormigón convencional

C30: hormigón con 30 % de ceniza

C25: hormigón con 25 % de ceniza

C20: hormigón con 20 % de ceniza

C15: hormigón con 15 % de ceniza

- **RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA**

Tabla AVI.15. Resultados para el valor promedio del ensayo de tracción indirecta del hormigón convencional y con ceniza a 28 días de curado

Tracción indirecta (kg/cm²)					
Ensayo	Tipo de hormigón				
	Convencional	C 30	C 25	C 20	C 15
1	24,73	11,66	13,04	13,96	18,26
2	22,65	14,06	14,53	15,07	18,26
3	23,61	13,65	14,32	14,64	18,21
Promedio	23,66	13,12	13,96	14,56	18,25

C30: hormigón con 30 % de ceniza

C25: hormigón con 25 % de ceniza

C20: hormigón con 20 % de ceniza

C15: hormigón con 15 % de ceniza

- **PESO ESPECÍFICO, ABSORCIÓN DE AGUA Y VOLUMEN DE POROS**

Tabla AVI.16. Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón convencional a 28 días de curado

Ensayo	Peso específico en seco (g/cm³)	Peso específico S.S.S (g/cm³)	Peso específico después de inmersión y de ebullición (g/cm³)	Absorción de agua (%)	Volumen de poros (%)
1	2,225	2,239	2,208	0,774	1,723
2	2,279	2,291	2,262	0,754	1,718
3	2,381	2,393	2,359	0,942	2,244
Promedio	2,295	2,308	2,273	0,822	1,895

Tabla AVI.17. Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 15 % a 28 días de curado

Ensayo	Peso específico en seco (g/cm ³)	Peso específico S.S.S (g/cm ³)	Peso específico después de inmersión y de ebullición (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Volumen de poros (%)
1	2,313	2,337	2,291	0,949	2,195
2	2,258	2,287	2,223	1,529	3,1452
3	2,246	2,280	2,229	0,760	1,708
Promedio	2,272	2,301	2,248	1,073	2,451

Tabla AVI.18. Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 20 % a 28 días de curado

Ensayo	Peso específico en seco (g/cm ³)	Peso específico S.S.S (g/cm ³)	Peso específico después de inmersión y de ebullición (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Volumen de poros (%)
1	2,246	2,260	2,207	1,765	3,967
2	2,282	2,295	2,262	0,892	2,037
3	2,276	2,288	2,254	0,963	2,192
Promedio	2,268	2,281	2,241	1,206	2,732

Tabla AVI.19. Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 25% a 28 días de curado

Ensayo	Peso específico en seco (g/cm ³)	Peso específico S.S.S (g/cm ³)	Peso específico después de inmersión y de ebullición (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Volumen de poros (%)
1	2,237	2,266	2,191	2,036	4,556
2	2,238	2,267	2,207	1,423	3,187
3	2,247	2,290	2,230	0,741	1,665
Promedio	2,241	2,274	2,209	1,399	3,136

Tabla AVI.20. Resultados de valores promedio para el peso específico y absorción de agua del hormigón con 30 % a 28 días de curado

Ensayo	Peso específico en seco (g/cm ³)	Peso específico S.S.S (g/cm ³)	Peso específico después de inmersión y de ebullición (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Volumen de poros (%)
1	2,162	2,275	2,124	1,740	3,763
2	2,253	2,264	2,241	1,730	3,900
3	2,233	2,260	2,213	0,882	1,970
Promedio	2,216	2,266	2,184	1,455	3,211

- **VELOCIDAD SÓNICA**

Tabla AVI.21. Resultados de valores promedio para la velocidad sónica del hormigón convencional y con 15, 20, 25 y 30 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Velocidad sónica (m/s)				
	HC	C30	C25	C20	C15
1	3 889	2 893	3 026	3 375	3 665
2	3 878	2 754	3 113	3 235	3 506
3	3 817	2 739	3 059	3 279	3 687
Promedio	3 861	2 795	3 066	3 296	3 619

HC: hormigón convencional

C30: hormigón con 30 % de ceniza

C25: hormigón con 25 % de ceniza

C20: hormigón con 20 % de ceniza

C15: hormigón con 15 % de ceniza

- **ADHERENCIA**

Tabla AVI.22. Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón convencional a 28 días de curado

Ensayo	Øb	lb	As	fs	N	μ
1	1,30	21,40	1,33	2 475,32	3 285,47	37,59
2	1,30	21,50	1,33	2 467,76	3 275,43	37,30
3	1,30	21,20	1,33	2 381,59	3 161,06	36,51
Promedio	1,30	21,37	1,33	2 441,56	3 240,65	37,14

Tabla AVI.23. Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 15 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Øb	lb	As	fs	N	μ
1	1,30	21,10	1,33	2 361,08	3 133,84	36,37
2	1,30	21,50	1,33	2 329,48	3 091,90	35,21
3	1,30	21,00	1,33	2 312,16	3 068,91	35,78
Promedio	1,30	21,20	1,33	2 334,24	3 098,21	35,79

Tabla AVI.24. Resultados de valores promedio para la Adherencia del hormigón con 20 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Øb	lb	As	fs	N	μ
1	1,30	23,20	1,33	2 262,35	3 002,80	31,69
2	1,30	22,90	1,33	2 289,68	3 039,07	32,50
3	1,30	23,00	1,33	2 278,90	3 024,76	32,20
Promedio	1,30	23,03	1,33	2 276,98	3 022,21	32,13

Tabla AVI.25. Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 25 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Øb	lb	As	fs	N	μ
1	1,30	22,40	1,33	2 168,90	2 878,76	31,47
2	1,30	22,50	1,33	2 048,32	2 718,72	29,59
3	1,30	23,90	1,33	2 087,85	2 771,18	28,39
Promedio	1,30	22,93	1,33	2 101,69	2 789,55	29,82

Tabla AVI.26. Resultados de valores promedio para la adherencia del hormigón con 30 % de ceniza a 28 días de curado

Ensayo	Øb	lb	As	fs	N	μ
1	1,30	22,10	1,33	2 067,65	2 744,37	30,41
2	1,30	22,70	1,33	1 975,87	2 622,55	28,29
3	1,30	21,90	1,33	2 010,56	2 668,60	29,84
Promedio	1,30	22,23	1,33	2 018,03	2 678,51	29,51