

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Chetumal



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHETUMAL

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO Y FÍSICO-QUÍMICO DE
UNA PASTA CEMENTANTE ADICIONADA CON CENIZA DE GALLINAZA
COMO SUSTITUTO PARCIAL DE CEMENTO PORTLAND”**

Tesis que para obtener el Grado de:

Maestro en Construcción

Presenta:

Ing. Alberto Zapata Valencia

Director de Tesis:

Dr. Julio Cesar Cruz Argüello

Chetumal, Quintana Roo, México,
Diciembre de 2018

Aunque este trabajo hubiere servido para examen de grado y hubiere sido aprobado por el H. Sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

Agradecimientos

A mis Padres, este trabajo culmina una de las tantas metas para las cuales me prepararon durante el tiempo que estuve bajo su cuidado, hoy comprendo las intenciones de sus corazones bondadosos, que, junto a mi hermano, nos hicieron llegar hasta el día de hoy.

A mis profesores, sus palabras, sus ejemplos, su compromiso con la educación, la ciencia y la investigación, marcaron en mí la convicción para con la verdad, a la cual buscamos parados sobre hombros de gigantes. Gracias Dr. Julio, Dra. Danna, Dra. Elia (UAC), Dr. Felipe, Dr. Vega, Maestro Yeladaqui, Maestro Bucio, Maestra Maritza, Maestro José Luis (Uqroo). Sin ustedes este trabajo nunca se hubiese completado en la forma en que está elaborado.

A mi Hermano, solo tú has sido testigo de mi crecimiento en todos los aspectos, a ti mi respeto y profundo agradecimiento, así como el amor que solo a un hermano mayor se le puede tener.

A mi Primo (primito), hemos compartido grandes aventuras y en esta no estuviste ausente, por miles de éxitos más en nuestras vidas y por seguir compartiendo el camino en las buenas y en las malas.

A esas personas que empezaron el camino a mi lado y hoy ya no están, no celebraré con ustedes, ni compartiremos la alegría de mi corazón, solo sepan que jamás las olvidaré, siempre serán una sección de las historias por contar en una tarde de domingo.

A mis amigos, desde la secundaria, la preparatoria, la licenciatura y la maestría, quienes en mis peores momentos emocionales estuvieron cerca, quienes me vieron caer, arrastrarme, detenerme, levantarme y seguir adelante, Frida, Miguel, Emanuel, Yeissy, Katya, Daniel, Chepe, Luis Ángel, David, Adán †, Susana, Diana, Charly, Oscar y especialmente Elmer, quién junto a su amistad me dio una familia adoptiva, un trabajo y fuertes convicciones de seguir adelante. A quienes saben lo especiales que fueron en mi vida, pero por circunstancias personales no hemos vuelto a hablar. A todos a quienes he llamado amigos, gracias por coincidir.

A Yas, con todo mi amor, con toda mi alegría, con todas mis ganas, te escribo a ti y a la familia que hoy tenemos. Les amo, les llevo a todos lados donde Dios me permite ser.

A Dios, por darme tan emocionante viaje, desde las penumbras de la noche, hasta la luz de cada amanecer. Soy Afortunado.

Contenido

LISTA DE TABLAS	III
LISTA DE FIGURAS	VI
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS	3
ANTECEDENTES	3
EL PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN Y EL CONCRETO.	4
LOS DESECHOS AGROPECUARIOS.....	11
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
MARCO TEÓRICO	19
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
BASES TEÓRICAS.....	27
JUSTIFICACIÓN	64
HIPÓTESIS O PREMISAS	65
OBJETIVOS	65
METAS	65
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	66
METODOLOGÍA	66
ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN.....	66
ETAPA 2: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN CON MAYOR DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA PASTA CEMENTANTE.	78
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	79
TABLA DE MUESTRAS	79
CAPÍTULO 3. TRABAJO DE LABORATORIO.....	81
ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN.....	82
ETAPA 2: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN CON MAYOR DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA PASTA CEMENTANTE.	97
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	101
ETAPA 1: CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE CALCINACIÓN.....	101
ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO	101

DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y FLUORESCENCIA DE RAYOS X	107
EVALUAR EL ÍNDICE DE ACTIVIDAD HIDRÁULICA DEL MATERIAL MEDIANTE LA NORMA NMX-C-273-ONNCCE.	117
ETAPA 2: DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN CON MAYOR DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA PASTA CEMENTANTE.	126
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
ANEXOS	147
ANEXO A SELECCIÓN DE LA RELACIÓN A/C	147
ANEXO B CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA	148
GRANULOMETRÍA	148
GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO, ASTM C 128.....	150
PESO VOLUMÉTRICO AGREGADO FINO	152
ANEXO C RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	153
ETAPA 1	153
ETAPA 2	154

Lista de Tablas

Tabla 1-1 Composición química de la gallinaza. Tomado de Lynch y otros (2013).	17
Tabla 1-2 Composición química de la gallinaza. Tomado de Acharya y otros (2014)..	17
Tabla 1-3 Análisis físico químico de la gallinaza. Tomado de Font-Palma (2002).	23
Tabla 1-4 Micrografías de distintas cenizas de gallinaza. Elaboración propia.	25
Tabla 1-5 Análisis EDX de las muestras de ceniza de gallinaza. Tomado de Lynch et al., (2013).	25
Tabla 1-6 Micrografías de distintas cenizas de gallinaza. Tomado de Acharya et al., (2014).	26
Tabla 1-7 Composición del Cemento portland. Tomado de NMX- C414-ONNCCE. ..	28
Tabla 1-8 Especificaciones y tolerancias de Cementos hidráulicos. Tomado de NMX-C-062-ONNCE y la norma NMX-C414-ONNCCE.	29
Tabla 1-9 Clasificación de materiales con Capacidad Puzolánica. Tomado de CFE (2001).	31
Tabla 1-10 Compuestos principales del Clinker.....	42
Tabla 1-11 Compuestos (fases del Clinker) en el Cemento Portland Ordinario. Tomado de (Sandoval, 2012).....	43
Tabla 2-1 Proporciones para mortero testigo	70
Tabla 2-2 Proporciones para mortero de ensayo	70
Tabla 2-3 Tolerancia del tiempo de ensayo a la compresión.	73
Tabla 2-4 Muestras para obtener material puzolánico a partir de la gallinaza.	79
Tabla 2-5 Muestras para evaluar el Índice de Actividad Hidráulica a 28 días.....	79
Tabla 2-6 Muestras para evaluar la composición química y cristalográfica de la ceniza	80
Tabla 2-7 Muestras para evaluar mecánicamente las sustituciones de Cemento Portland.	80
Tabla 3-1 Procedimiento realizado para la calcinación de la gallinaza a 600 °C, 700 °C, 800 °C Fuente: Propia	90
Tabla 3-2 Procedimiento para graduar las arenas.....	91
Tabla 3-3 Procedimiento realizado para la calcinación de la Gallinaza a 800 °C.....	97
Tabla 3-4 Proporciones para pasta cementante testigo (6 cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)	99
Tabla 3-5 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C en un 10% de sustitución (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm).....	99

Tabla 3-6 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C en un 15% de sustitución (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm).....	99
Tabla 3-7 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C en un 20% de sustitución (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm).....	100
Tabla 4-1 Resultados del análisis por Fluorescencia de rayos X de los tallos de pimiento, tallos de algodón y tallo de trigo.	106
Tabla 4-2 Muestras obtenidas de los tratamientos térmicos. Fuente: Propia	107
Tabla 4-3 Tratamiento de muestras para la gallinaza	108
Tabla 4-4 Contenido de los componentes estructurales. Tomado de Vassilev et al., (2012).	109
Tabla 4-5 Composición Química de la Gallinaza. Fuente: Propia.	109
Tabla 4-6 Patrones de Difracción para la gallinaza. Fuente: Propia.	110
Tabla 4-7 Composición Química de la Ceniza tratada a 600 °C. Fuente: Propia	110
Tabla 4-8 Patrones de Difracción para la gallinaza a 600 °C. Fuente: Propia.	110
Tabla 4-9 Composición Química de la Ceniza tratada a 700 °C. Fuente: Propia	111
Tabla 4-10 Patrones de Difracción para la gallinaza a 700 °C. Fuente: Propia.	111
Tabla 4-11 Composición química de la Ceniza tratada a 800 °C.....	111
Tabla 4-12 Patrones de Difracción para la gallinaza a 800 °C. Fuente: Propia.	112
Tabla 4-13 Comparación de la composición química de las muestras. Fuente: Propia.	112
Tabla 4-14 Comparación de los patrones de Difracción de Rayos X de las muestras. Fuente: Propia.....	113
Tabla 4-15 Composición Química de las Cenizas Tipo CK y las muestras. Fuente: Propia.	114
Tabla 4-16 Campos de aplicación industrial para las cenizas tipo CK. Tomado de: Vassile, Baxter, Andersen & Vassileva (2013).....	116
Tabla 4-17 Composición de los especímenes para evaluar el Índice de Actividad Hidráulica.	117
Tabla 4-18 Índice de Actividad Hidráulica de la ceniza de cascarilla de arroz y la ceniza de palma de aceite. Tomado de: Sata, Tangpagasit, Jaturapitakkul, & Chindaprasirt, (2012).	118
Tabla 4-19 Valores promedios alcanzados por las muestras elaboradas con las tres sustituciones al 20% de Cemento Portland. Fuente: Propia.	120

Tabla 4-20 Comparación del Índice de Actividad Hidráulica de cenizas volantes y las muestras elaboradas con gallinaza.....	123
Tabla 4-21 Incremento del Índice de Actividad Hidráulica en ceniza de bagazo de caña con distintos tamaños de partícula. Tomado de G C. Cordeiro (2008).	124
Tabla 4-22 Cambio del Índice de Actividad Hidráulica resultado del incremento de la temperatura.	124
Tabla 4-23 Dosificación de los materiales utilizados para la elaboración de los especímenes con diferentes porcentajes de sustitución. Fuente: Propia.....	126
Tabla 4-24 Índice de Actividad Hidráulica de las muestras elaboradas CPC-07, G-800-10-07, G-800-15-07, G-800-20-07. Fuente: Propia.....	127
Tabla 4-25 Índice de Actividad Hidráulica de las muestras elaboradas CPC-28, G-800-10-28, G-800-15-28, G-800-20-28. Fuente: Propia.....	129
Tabla 4-26 Índice de Actividad Hidráulica de las muestras elaboradas CPC-90, G-800-10-90, G-800-15-90, G-800-20-90. Fuente: Propia.....	130
Tabla 4-27 comparativa de los índices de Actividad Hidráulica alcanzados por ceniza volante sin tratamiento y con tratamiento frente a los resultados obtenidos para la gallinaza. Tomado de Chindaprasirt et al., (2005)	132
Tabla Anexo A-1 Proporciones para pasta cementante testigo con diferentes relaciones a/c	147
Tabla Anexo A-2 Resistencia a la compresión de pastas cementantes con diferentes relaciones a/c	147
Tabla Anexo B-1 Clasificación de arena según NMX-C-061-ONNCCE-2001	148
Tabla Anexo B-2 Pesos Arena Retenida Acumulada Arena 7 días.....	148
Tabla Anexo B-3 Pesos Arena Retenida Acumulada Arena 28 días.....	149
Tabla Anexo B-4 Pesos Arena Retenida Acumulada Arena 90 días.....	149
Tabla Anexo B-5 Densidad Relativa Agregado Fino Suelto Húmedo	150
Tabla Anexo B-6 Densidad Relativa Agregado Fino Suelto Húmedo	150
Tabla Anexo B-7 Densidad Relativa Agregado Fino Suelto Húmedo	151

Lista de Figuras

Figura 1-1 Esquema de la producción del Cemento Portland.	7
Figura 1-2 Tomado de Imbabi et al (2012). Muestra la proyección de emisiones de CO2 de la industria del Cemento si no se realizan cambios en los métodos de producción. ...	8
Figura 1-3 Tomado de Imbabi et al., 2012 muestra el incremento constante de la producción de Cemento desde 1990 a 2050.	8
Figura 1-4 Fotografía de la gallinaza producida en una granja	12
Figura 1-5 El estiércol es recolectado íntegramente de gallinas ponedoras.	14
Figura 1-6 Difracción de rayos X de la ceniza de gallinaza. Tomado del archivo de la maestría en construcción del Instituto Tecnológico de Chetumal.	18
Figura 1-7 Tamaño de las partículas de diferentes cenizas de gallinaza. Tomado de Lynch et al., (2013).	24
Figura 1-8 Micrografía de la ceniza HE1. Tomado de Lynch et al., (2013)	25
Figura 1-9 Micrografía de la ceniza HE2. Tomado de Lynch et al., (2013)	25
Figura 1-10 Micrografía de la ceniza CYC. Tomado de Lynch et al., (2013)	25
Figura 1-11 Micrografía de la ceniza BH. Tomado de Lynch et al., (2013)	25
Figura 1-12 Diagrama de disposición y uso de materiales de desperdicio en la fabricación del Cemento Portland. Tomado Martínez Reyes, (2007).	27
Figura 1-13 Clasificación de materiales con potencial puzolánico.	32
Figura 1-14 Proceso de combustión del carbón y formación de ceniza volátil. Tomado de (Martínez Reyes, 2007).	35
Figura 1-15 Escoria de alto horno granulada. Tomada de (Martínez Reyes, 2007).	36
Figura 1-16 Escoria de alto horno enfriada al aire. Tomada de (Martínez Reyes, 2007).	38
Figura 1-17 Partícula de humo de sílice. Tomado de (Martínez Reyes, 2007).	38
Figura 1-18 Diagrama de los compuestos del Cemento	42
Figura 1-19 Representación del Cristal cúbico de la sal de gema	52
Figura 1-20 Luz incidiendo sobre una superficie.	54
Figura 1-21 Diagrama del tubo de rayos X	55
Figura 1-22 Esquematación de Rayos X incidiendo en un Cristal.	56
Figura 1-23 Haces Incidentes Reflejados en un Cristal de Hierro	57
Figura 1-24 Técnicas de caracterización.	58
Figura 1-25 Clasificación de la cristalinidad	59

Figura 2-1 Difractómetro. Fuente: Propia	67
Figura 2-2 Pruebas a realizar sobre la gallinaza cruda. Fuente: Propia.....	67
Figura 2-3 Equipo Perkin Elmer ATG 4000. Fuente: www.perkinelmer.com.....	68
Figura 2-4 Esquema de obtención del IAH. Fuente: Propia.....	69
Figura 2-5 Procedimiento de análisis para la gallinaza	77
Figura 2-6 Procedimiento de la evaluación mecánica.	78
Figura 3-1 Gravilla retenida en la malla No. 10. Fuente Propia.....	82
Figura 3-2 Gallinaza cribada por la malla No. 10. Fuente: propia.	82
Figura 3-3 Equipo Perkin Elmer ATG 4000. Fuente: www.perkinelmer.com.....	83
Figura 3-4 Muestra de ceniza antes del molido en mortero. Fuente: Propia.	84
Figura 3-5 Muestra de ceniza después del molido en mortero. Fuente: Propia.....	84
Figura 3-6 Porta muestras listo para introducirse al difractómetro. Fuente: Propia.....	85
Figura 3-7 Difractómetro. Fuente: Propia	85
Figura 3-8 Porta muestras limpios y material necesario para colocar las muestras. Fuente: Propia.....	86
Figura 3-9 Porta muestras en proceso. Fuente: Propia	86
Figura 3-10 Porta muestra listo. Fuente: Propia	87
Figura 3-11 Muestra colocada en la porta muestra. Fuente: Propia	87
Figura 3-12 Se verifica la zona de lectura de material. Fuente: Propia.....	88
Figura 3-13 Porta Muestra cargado, colocado dentro del equipo de Fluorescencia de rayos X. Fuente: Propia.....	88
Figura 3-14 Secado al sol	90
Figura 3-15 Cribado	90
Figura 3-16 Crisoles para calcinación	90
Figura 3-17 Calcinación	90
Figura 3-18 Molienda de la ceniza	90
Figura 3-19 Cribado Malla #200	90
Figura 3-20 Recolecta en banco de material	91
Figura 3-21 Cuarteo del material.....	91
Figura 3-22 Cribado y selección del tamaño de grano	91
Figura 3-23 Dosificación según normativa	91
Figura 3-24 Peso de la arena	94
Figura 3-25 Peso de la ceniza.....	94

Figura 3-26 Mezclado de los materiales a	94
Figura 3-27 Mezclado de los materiales b	94
Figura 3-28 Ensayo fluidez a	94
Figura 3-29 Ensayo fluidez b	94
Figura 3-30 Ensayo fluidez c	95
Figura 3-31 Ensayo fluidez d	95
Figura 3-32 Moldeado de especímenes a	95
Figura 3-33 Moldeado de especímenes b	95
Figura 3-34 Curado a	95
Figura 3-35 Curado b	95
Figura 3-36 Prueba de compresión a	96
Figura 3-37 Prueba de compresión b	96
Figura 3-38 Secado al sol de la gallinaza	97
Figura 3-39 Cribado de la gallinaza	97
Figura 3-40 Uso de crisoles para calcinación	98
Figura 3-41 Calcinación en mufla	98
Figura 3-42 Molienda de la ceniza	98
Figura 3-43 Cribado por la malla #200 de la ceniza	98
Figura 4-1 Análisis Termogravimétrico de la gallinaza. Fuente: Propia	101
Figura 4-2 Análisis Termogravimétrico de la ceniza de gallinaza señalando las cuatro principales regiones de la descomposición térmica. Fuente: Propia.	102
Figura 4-3 Análisis Termogravimétrico de la cáscara de café.	103
Figura 4-4 Análisis Termogravimétrico del bagazo de molino	104
Figura 4-5 Análisis Termogravimétrico de cáscara de nuez de anacardo	104
Figura 4-6 Análisis Termogravimétrico del tronco de agave	105
Figura 4-7 Análisis Termogravimétrico del tallo de palma	105
Figura 4-8 Difracción de Rayos X de las cenizas de Gallinaza. Fuente: Propia	115
Figura 4-9 Porcentaje de fluidez alcanzado por las muestras elaboradas de CPC, G600, G700, G800. Fuente: Propia.	118
Figura 4-10 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC, G600, G700, G800. Fuente: Propia.	119
Figura 4-11 Resistencia a la compresión de dos sustituciones al 20% de ceniza de bagazo de caña, curadas a 7, 28 y 60 días. Tomado de: Frías et al., (2017).	121

Figura 4-12 Resistencia a la compresión en promedio de los especímenes elaboradas con ceniza de gallinaza y curado a los 28 días.	122
Figura 4-13 Micrografías de las cenizas de bagazo de caña sometidas a molienda durante 8 minutos y 240 minutos respectivamente. Tomada de G C. Cordeiro et al., (2008). .	123
Figura 4-14 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC-07, G-800-10-07, G-800-15-07, G-800-20-07. Fuente: Propia.....	127
Figura 4-15 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC-28, G-800-10-28, G-800-15-28, G-800-20-28. Fuente: Propia.....	128
Figura 4-16 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC-90, G-800-10-90, G-800-15-90, G-800-20-90. Fuente: Propia.....	129
Figura 4-17 Resistencia a la compresión de las cenizas de bambú, contrastada con la actividad de la ceniza de bagazo de caña, una muestra testigo, una puzolana natural y la combinación de dos de ellas a diferentes edades de curado. Tomado de: Rodier et al., (2017).	131
Figura 4-18 Resistencia a la compresión promedio de cada porcentaje de sustitución así como la muestra testigo, reflejo de la tendencia al incremento de la temperatura.	132
Figura 4-19 Índice de Actividad Hidráulica alcanzado por diferentes sustituciones de Cemento Portland, resaltando los altos valores para la ceniza de gallinaza obtenida a 800 °C de calcinación en un 10 % de sustitución y para cualquier edad de curado. Fuente: Propia.....	133
Figura Anexo B-1 Análisis Granulométrico de las arenas utilizadas.....	150

Resumen

Los materiales cementantes suplementarios son una de las opciones más favorables en la búsqueda de sustitutos parciales en la elaboración de Cementos y concretos dentro de la industria de la construcción, los existen desde desechos industriales hasta desechos agrícolas comúnmente llamados biomasa.

La biomasa se incinera en una diversidad de métodos a nivel mundial para encontrar el procedimiento más favorable, tanto para nuestra necesidad energética, así como para la obligación de ser sustentables. Es esto último lo que nos motiva a generar investigación sobre las cenizas generadas como desechos.

La gallinaza, una biomasa incinerada en muchos lugares del mundo, se somete a Análisis Termo Gravimétrico, para determinar temperaturas de calcinación, Difracción y Fluorescencia de Rayos X, para determinar composición química y cristalográfica generadas en las cenizas, y por último al Índice de Actividad Hidráulica, para determinar la aportación que produce a la característica más importante de las pastas cementantes la resistencia a la compresión axial.

Encontramos que la calcinación de la gallinaza a 800 °C genera cenizas que, considerando su composición química y cristalográfica, sus características físicas y mecánicas generadas dentro de una matriz de Cemento arena, tienen excelente actividad cementicia. Al sustituir un 10% de Cemento Portland Compuesto por las cenizas mencionadas se registró la mayor aportación a la resistencia a la compresión alcanzando un 143.09% de Índice de Actividad Hidráulica a los 7 días de curado, 97.61% a los 28 días de curado y 132.45% a los 90 días de curado.

Abstract

The supplementary cementitious materials are one of the most favorable options in the looking for partial replacements in the manufactured of cements and concretes in the construction industry, these materials are supplied from the industry waste until agroindustry waste, the last one is call biomass

The biomass is burning in a variety of methods in all over the world for seeking the most favorable procedure to satisfy our energetic necessity and even more our duty to be sustainable. Be sustainable is the reason to generated investigation about the ashes generated as waste.

The Hen Litter is a biomass incinerated in a lot of places of the world, it is examined whit thermogravimetric analysis, to stipulated temperatures of calcination, Diffraction y Fluorescence of X-ray to stipulate the chemical composition and crystallographic arrangement in the generated ashes and the last one the strength activity index to know the contribution for the most important characteristic of the cement paste, the axial resistance.

We found that the ashes generated at 800 °C of heat treatment have excellent cementitious activity, thus considering its chemical composition, crystallographic arrangement, physical and mechanical properties in the matrix with cement and sand. At 10% of substitution of cement Portland by the ashes, was recorded the mayor contribution to the resistance compressive with a strength activity index of 143.09% at 7 days of cured, 97.61% at 28 days of cured and 132.45% at 90 days of cured.

Introducción

La búsqueda de nuevos materiales innovadores es uno de los caminos para resolver la creciente necesidad de la industria de la construcción por ser sustentable en todos los aspectos en los que se desarrolla.

La presente es una propuesta para obtener un Cemento ecoeficiente, mediante la sustitución parcial de Cemento Portland por ceniza de gallinaza.

La sustitución parcial de Cemento por materiales cementantes suplementarios (MCS) ha logrado la reutilización de residuos de diversas industrias como lo son las escorias granulares de alto horno y las cenizas volantes, estos residuos se utilizan como adiciones puzolánicas de manera normada en diferentes códigos nacionales; mediante la sustitución parcial se ha logrado mejorar las características físicas y mecánicas de los morteros y concretos tradicionalmente elaborados con Cemento Portland Ordinario.

La industria del Cemento Portland es causante de aproximadamente el 7% de las emisiones totales de CO₂ generadas en todas las actividades de la humanidad, siendo esta industria una de las que mayor participación tiene en la construcción, debido a que el Cemento portland es el principal constituyente del concreto y este a su vez es el material más utilizado en el mundo solo por debajo del uso del agua.

Actualmente se están realizando investigaciones académicas y científicas en la búsqueda de nuevos materiales con actividad puzolánica que sean aptos para ser sustitutos parciales del Cemento portland, liderando esta búsqueda se encuentran aquellos que provienen de residuos pertenecientes a otras industrias con el fin de no involucrar nuevos procesos industriales para obtenerlos y así evitar generar nuevas emisiones de gases de efecto invernadero.

Dentro de los residuos que se están investigando para la producción de MCS, podemos mencionar los de origen industrial: la escoria granulada de alto horno la cual es un sub producto de la industria del acero, las cenizas volantes provenientes de la quema de carbón en plantas de energía eléctrica, el humo de sílice que es un sub producto de la industria del

silicio y el ferro silicio y los de origen agrícola: la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de palma de aceite y la ceniza de bagazo de caña.

Estos residuos son considerados como productos de cero emisiones de CO₂ y por sus propiedades físicas y químicas han logrado captar la atención de los investigadores que buscan sustituir parcialmente al Cemento portland.

Una característica de México es que se encuentra en vías de desarrollo, con una industria del Cemento perteneciente a los 15 mayores productores de Cemento del mundo entre los que se encuentran países como Estados Unidos, China, India, Brasil entre otros, compartiendo los retos y dificultades que la reducción de emisiones de CO₂ significa.

Nuestro país tiene un alto potencial para incrementar su producción agropecuaria en las siguientes décadas, toma gran relevancia la industria avícola por las expectativas de crecimiento que se tienen de ella debido a la alta dependencia de la dieta mundial a estos productos, de manera adversa esto incrementará la generación de residuos como la gallinaza que se caracteriza por ser un peligroso contaminante del suelo, del agua y del aire.

Esta propuesta busca integrar un residuo, de alto impacto negativo, a la industria del Cemento como adición puzolánica y contribuir al desarrollo sustentable de la nación.

Se hace énfasis en la caracterización de la ceniza de gallinaza mediante Análisis Termogravimétrico (ATG) Difracción de rayos X (DRX), Fluorescencia de rayos X (FRX), el Índice Actividad Hidráulica (NMX-C-273-ONNCCE) y en la caracterización físico química y mecánica de pasta cementante adicionada con la ceniza de gallinaza se proponen Resistencia a la compresión (NMX-C-061-ONNCCE), Fluidez (NMX-C-061-ONNCCE).

Para establecer las características más importantes de una pasta cementante y que sea susceptible de uso en la industria de la construcción.

Capítulo 1. Fundamentos

Antecedentes

El desarrollo sustentable es pensado como todas aquellas formas de progreso que satisfacen las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para solventar las necesidades del futuro, los concretos hechos con Cementos hidráulicos (en su mayoría constituidos por Cemento Portland) son por mucho los más utilizados como material de construcción en el mundo, por lo que tienen un fuerte impacto en el medio ambiente y en el desarrollo sustentable (Damtoft, Lukasik, Herfort, Sorrentino, & Gartner, 2008).

Según Czarnecki, Hager, & Tracz (2015), existen diversos factores que distinguen la construcción y la hacen un área particularmente atractiva para la investigación y significativa desde el punto de vista de la economía:

- La construcción consume anualmente más de 40% de la producción mundial de materiales y energía. Se espera que esta disciplina que utiliza tantos materiales este fundamentada en principios científicos así como en implementar los principios del desarrollo sustentable lo cual se vuelve una necesidad (Czarnecki et al., 2015).
- No existe otra disciplina donde los productos finales tengan una vida de servicio más larga que la esperada por los diseñadores. Varios aspectos de la construcción están enfocados en la durabilidad y la seguridad (Czarnecki et al., 2015).
- Existe una particular atención en el hecho de que “las dimensiones de interés” en la construcción cubren 15 rangos desde lo nano (10^{-9}) hasta lo macro (10^3) y en consecuencia los objetos de estudio son muy diversos en complejidad (Czarnecki et al., 2015).

Dentro de las fuerzas directrices a nivel mundial que afectan el rumbo de la ingeniería de materiales de construcción se puede mencionar el desarrollo sustentable y la nanotecnología las cuales son fundamentales desde el inicio del siglo (Czarnecki et al., 2015).

El Planteamiento del problema

La industria de la construcción y el concreto.

El concreto es un material de construcción básico que seguirá estando en demanda en el futuro. Un mundo sin concreto, y su principal componente, el Cemento Portland ordinario (CPO), es difícil de imaginar (Flatt, Roussel, & Cheeseman, 2012; Imbabi, Carrigan, & McKenna, 2012).

En la industria de la construcción, una de las más grandes a nivel mundial, el concreto es el material de edificación más utilizado, debido a sus características de adquirir diversas formas, su resistencia a la compresión, trabajabilidad en obra, y en ciertas ocasiones menor costo en comparación a otros materiales de construcción. Utilizado en una gran variedad de construcciones, en obras civiles como casas-habitación, edificios, presas, puentes entre otros. “Se ha estimado que la producción de concreto a nivel mundial está alrededor de 6 mil millones de toneladas por año” (Marinković, 2013).

El concreto es una mezcla de agregados gruesos (como roca triturada, variando en tamaño desde los 5 hasta los 20 mm), agregado fino (como la arena, variando en diámetro desde los 63 micrómetros hasta los 5 mm) y un aglutinante cementicio (Imbabi et al., 2012).

Debido a la gran producción de concreto a nivel mundial, se realizan diversas actividades que impactan al medio ambiente, Marinković (2013) señala cuatro grandes rubros en que esto sucede:

- Gran consumo de recursos naturales. - debido principalmente a la extracción de los agregados pétreos que forman parte del concreto
- Gran consumo de energía (en su mayoría por la producción de Cemento y acero de refuerzo, también, por la operación y mantenimiento de las estructuras de concreto y por último debido de la transportación, construcción, demolición y disposición final del concreto).

- Grandes emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente CO₂ que es responsable del cambio climático y es originado principalmente por la producción de Cemento y el consumo de energía).
- Gran cantidad de desechos de construcción y demolición.

Dentro de los componentes del concreto, el aglutinante cementicio utilizado en grandes cantidades dentro de la industria actualmente, es el Cemento Portland, el cual durante su producción se consumen grandes cantidades de energía y se libera CO₂, por lo que es uno de los procesos que llama la atención y que, en la búsqueda de un desarrollo sustentable a nivel mundial, adquiere mayor relevancia en la exploración de nuevos procedimientos, optimización y sustitución de las materias primas y procesos de elaboración del Cemento portland.

El Cemento portland.

En México la propaganda de la industria del Cemento ha trabajado para unir el Cemento con la modernidad, la clase trabajadora, la unidad familiar y el desarrollo sustentable (Fry, 2013), forjándose como parte de la cultura popular y acrecentando la dependencia de la nación a este producto.

El uso de Cemento se conoce desde la antigüedad, éste se elaboraba mediante la mezcla de puzolanas naturales y la cal, generando aglomerantes de gran resistencia.

Fue hasta 1824 que nace el Cemento portland de manos de Joseph Aspdin al serle aceptada una patente en la que describió como producir una piedra artificial. Fue tal el éxito que en 1890 ya se producían 2 millones de toneladas de Cemento portland en el mundo, marcando el inicio de la producción industrial del Cemento (Habert, 2013).

La producción industrial de Cemento empezó en la mitad del siglo XIX, con hornos de eje, posteriormente sustituidos por hornos rotatorios como equipo estándar a nivel (Schneider, Romer, Tschudin, & Bolio, 2011), la producción mundial en 2012 ha superado los 3.6 mil millones de toneladas de Cemento portland (Armstrong, 2013).

Esta importante producción corresponde a la creciente demanda de productos a base Cemento, lo que ha propiciado que la industria del Cemento se enfrente a grandes retos, como los incrementos en los costos de suministros de energía, los requerimientos solicitados para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, así como el suministro de materias primas en cantidad y calidad (Schneider et al., 2011).

El Cemento Portland ordinario (OPC) es el Cemento contemporáneo de mayor producción en el mundo, es una mezcla de componentes producidos por la calcinación de caliza y arcilla juntas, en hornos de eje a una temperatura que ronda los 1450°C (Imbabi et al., 2012).

El principal componente del Cemento es el Clinker, el cual contiene principalmente CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃. Para obtener estos cuatro componentes principales se necesitan que las materias primas, como caliza, sílice, óxidos de aluminio y de hierro, sean pulverizadas y mezcladas en silos y sean vertidos al sistema de precalentamiento el cual disocia los

carbonatos a óxidos de calcio y dióxido de carbono, esta mezcla se introduce al horno para calentarlo. Una reacción toma lugar entre el óxido de calcio y otros elementos para producir silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos aproximadamente a 1500°C. Cuando el Clinker se enfría a cierta temperatura, se forma una mezcla principalmente de C3S, C2S, C3A y C4AF. El Clinker es entonces molido y mezclado con yeso, caliza y/o cenizas para obtener el Cemento, la Figura 1-1 muestra un esquema de la producción del Cemento portland.

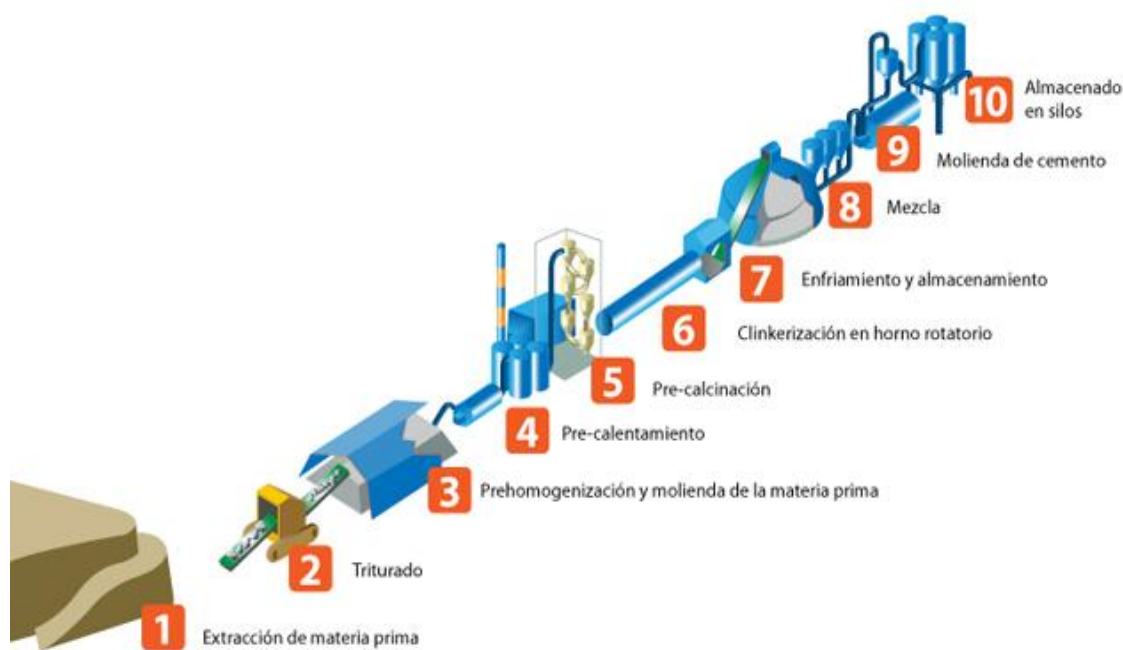


Figura 1-1 Esquema de la producción del Cemento portland.

El proceso de fabricación del Cemento portland tiene asociado una serie de efectos negativos desde el punto de vista energético y medioambiental, debido a las altas temperaturas que son necesarias para que se completen todas las reacciones químicas que dan lugar a la creación del Clinker, así como al proceso de molienda de este y a la explotación de canchales para obtener la materia prima. Existe una alta emisión de gases de efecto invernadero a la atmosfera, se estima que la industria del Cemento es responsable de cerca del 7% de las emisiones de CO₂ generadas por el hombre (Ali, Saidur, & Hossain, 2011; Gartner & Hirao, 2015), en la Figura 1-2 se muestran las futuras emisiones de CO₂ si ningún cambio se realiza en los métodos actuales de producción del Cemento portland a escala mundial.

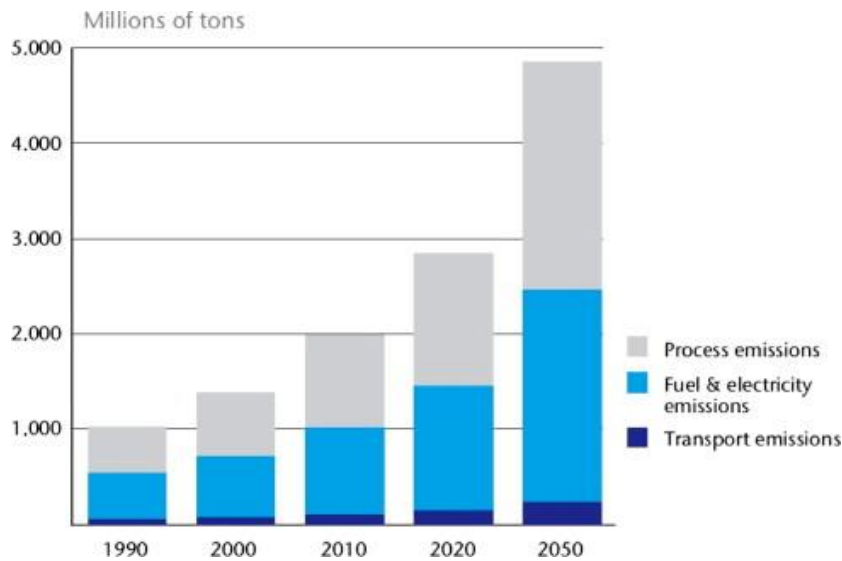


Figura 1-2 Tomado de Imbabi et al (2012). Muestra la proyección de emisiones de CO2 de la industria del Cemento si no se realizan cambios en los métodos de producción.

Es tal nuestra dependencia en el Cemento Portland ordinario que actualmente en el mundo se producen cerca de 3.6 mil millones de toneladas de este material cada año y se pronostica un ascenso en la producción de más de 5 mil millones de toneladas para 2030 (Imbabi et al., 2012). La Figura 1-3 muestra el incremento constante de la producción de Cemento desde 1990 a 2050, esto es esperado ya que el Cemento es el segundo producto más consumido a nivel mundial después del agua.

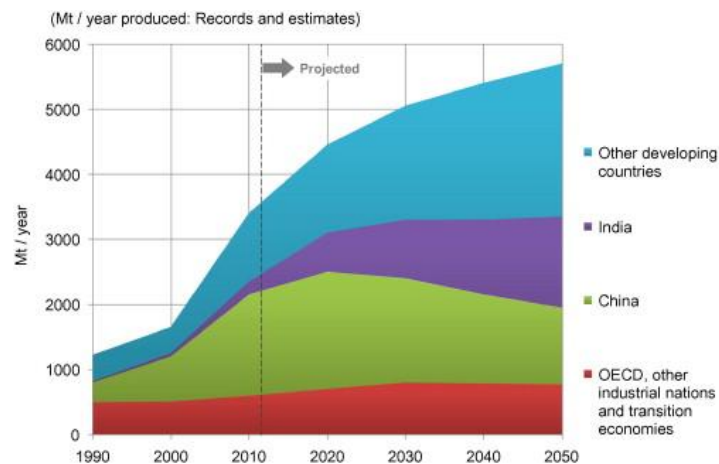


Figura 1-3 Tomado de Imbabi et al., 2012 muestra el incremento constante de la producción de Cemento desde 1990 a 2050.

El ritmo de crecimiento de las emisiones continuará sin reducir debido al crecimiento esperado de la población, la constante industrialización y las actividades económicas de los países en vías de desarrollo, notablemente en Latino América, África, el Medio Oriente, la India y demás países en Asia donde se pronostica tres o cuatro veces mayor demanda (Imbabi et al., 2012). Nuestro país, México, se encuentra dentro de los 15 mayores productores de Cemento portland a nivel mundial (Armstrong, 2013), por lo que se espera un incremento en la producción de Cemento portland y su consecuente aumento de las emisiones de CO₂ y surge la necesidad de aplicar las diferentes técnicas que se desarrollan a nivel mundial para disminuir las emisiones y favorecer al desarrollo sustentable de la nación.

Dentro de los esfuerzos necesarios para atenuar esta grave situación, Ali y otros (Ali et al., 2011) proponen:

- Uso del calor perdido como fuente de energía.
- Implementación de tecnología de captura y almacenamiento de CO₂. Sin embargo, extensas preocupaciones relacionadas con la seguridad a largo plazo y alto costo sugiere que ideas como presurizar, almacenar por bombeo y licuar CO₂ en formaciones geológicas puede no ser ni técnica ni comercialmente viable (Imbabi et al., 2012).
- Incrementar el uso de energías renovables o energía nuclear.
- Utilizar sustitutos parciales o totales en materias primas y/o combustibles. El uso de combustibles y materias primas alternativas para la producción de Clinker es ciertamente de gran importancia por la manufactura del Cemento, pero más para la sociedad como un todo. El uso de combustibles alternativos comenzó en la mitad de los 1980's. comenzando en las líneas del calcinador, alrededor del 100% de combustible alternativo en la etapa del pre calentador fue logrado muy rápidamente (Schneider et al., 2011).
- Utilizar cementantes adicionados, reduciendo la proporción Clinker/Cemento.

Esta última propuesta, es una de las técnicas utilizadas en la actualidad que mayor reducción de las emisiones de CO₂ ha logrado (Kajaste & Hurme, 2016).

Esta reducción se logra con adiciones puzolánicas, principalmente se han utilizado:

- Cenizas volantes. – son un subproducto de la quema de carbón para generar energía.
- Escorias de alto horno. – son un subproducto de la industria del acero.
- Puzolanas naturales. – son cenizas volcánicas principalmente.
- Humo de sílice. – son un subproducto de la industria del silicio y del ferro silicio.

Teniendo como característica principal el que son subproductos de diversos procesos, naturales e industriales, y que no tienen un uso comercial definido fuera de la industria del Cemento como puzolanas.

Los desechos agropecuarios

Existen cerca de 200 productos agrícolas y pecuarios que se cultivan y producen en México, destacando algunos que son de importancia porque se destinan al consumo humano directo y otros porque se canalizan al mercado exterior con la consecuente generación de divisas para el país (Martínez & Becerra, 1988).

Las actividades agropecuarias generan una gran cantidad de subproductos y desechos, de los cuales solamente algunos tienen un uso definido.

En la industria manufacturera de alimentos balanceados para animales se utilizan las pastas de soya, de ajonjolí, de algodón, de cártamo, de coco, de sorgo y de girasol, el pulido de arroz y los salvados de trigo y de cebada. Como fertilizantes agrícolas, los desechos orgánicos son de gran importancia y en algunos casos también son usados como alimento directo para el ganado; tal es el caso de la pollinaza; otro uso importante de éstos es como combustibles para lo cual se utilizan principalmente los rastrojos de maíz y de copra (Martínez & Becerra, 1988).

Los desechos que no tienen un uso definido actualmente son quemados, lo cual, es una práctica tradicional muy común en México para eliminarlos de cosechas de maíz, frijol, trigo, arroz y otros granos. También se queman ramas y malezas en huertos de árboles frutales, nogales y viñedos, así como estiércol de aves y ganado. Desafortunadamente, en ese proceso también puede producirse la quema de costales y plásticos usados en invernaderos y zanjas, costales de insecticidas y fertilizantes, papel y plásticos para protección (utilizados, por ejemplo, en los cultivos de plátanos y dátiles) y bandejas de secado, entre otros, mezclados con residuos de cultivos, lo que contribuye aún más a la contaminación (CCA, 2014).

Se estima que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos —incluidos los residuos agrícolas—, produce 40% del dióxido de carbono (CO₂), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% de la materia particulada o partículas de materia suspendidas (PM) y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos al ambiente a escala mundial (CCA, 2014).



Figura 1-4 Fotografía de la gallinaza producida en una granja

La avicultura

La avicultura corresponde a la producción de pollos de engorda, gallinas ponedoras, pavos y patos, en México esta producción de aves ha crecido de 750,427 a 2'681,117 cabezas correspondientes de 1990 a 2010 indicando un crecimiento del 6.6% (Hernández Trujillo & Padilla Herrera, 2015), la cual incrementará en próximos años debido al incremento de la población y que las aves representan la principal ingesta de proteínas de las poblaciones en los países en vías de desarrollo (FAO, 2013a).

De esta producción se generan residuos que van desde los excrementos de las aves, hasta las vísceras y plumas de estos cuando son sacrificados y puestos a la venta para consumo humano.

Es importante mencionar que toda la producción avícola, se realiza en cuatro grandes sistemas:

- Explotaciones comerciales de gran escala. – caracterizadas principalmente por tener instalaciones de gran tamaño automatizadas, su principal labor es mantener condiciones ambientales favorables al confort térmico de las aves y así lograr mayor rendimiento en la producción de estas.
- Explotaciones comerciales de mediana escala. – se caracterizan por ser de gran tamaño, pero todos sus procesos son por parte de manos humanas.
- Explotaciones comerciales de pequeña escala. – estas explotaciones se caracterizan por ser espacios de mediano tamaño en los cuales su única tecnología es el cuidado del genotipo para asegurar la mayor producción posible
- Sistemas de pequeña escala. – mejor conocidos como cría de traspatio, en la cual las aves son endémicas y alimentadas con residuos, este tipo es el más común, ya que representa el autoconsumo de la mayoría de las comunidades rurales de los países en desarrollo.

A partir de estas producciones se generan los residuos que, como en muchas otras industrias, son el problema principal en la actualidad, como se mencionó anteriormente, no tienen un uso definido.

De la avicultura podemos mencionar que uno de los residuos de mayor producción se encuentran los excrementos, pollinaza, gallinaza, etc.

La Gallinaza es el estiércol de las gallinas ponedoras mezclado con la cama (fotografía 1), la cual puede estar compuesta por aserrín, virutas de madera, paja, cáscaras de maní o cascarilla de arroz (Font-Palma, 2012).

La producción de la gallinaza es uno de los principales problemas sanitarios que enfrenta hoy en día la industria avícola.

Según la FAO, cada mil gallinas ponedoras generan 120 kg al día de excremento, este dato se puede extra polar para aproximar la generación de excremento en México, en 2012 se generó 16,440 toneladas de excremento al día (FAO, 2013a).



Figura 1-5 El estiércol es recolectado íntegramente de gallinas ponedoras.

De forma tradicional esta gallinaza se dispone sobre las tierras de cultivo como fertilizante, pero debido a lo agresivo que resulta la gallinaza en grandes cantidades, producen problemas ambientales, principalmente en la calidad del agua subterránea ya que compuestos como el nitrato y el fósforo se infiltran a través del suelo y en grandes cantidades en el agua de

consumo pueden causar metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul), cáncer y enfermedades del sistema respiratorio (BOLAN et al., 2010; Kelleher et al., 2002).

También contamina el aire, aunque los procesos son poco estudiados, la gallinaza produce amoníaco, sulfuro de hidrogeno, compuestos orgánicos volátiles y polvo (BOLAN et al., 2010), en las unidades de producción que se encuentran cerca de zonas habitadas se puede agregar como problema ambiental los malos olores que producen esta actividad (FAO, 2013b).

En la actualidad se proponen diferentes oportunidades para deshacerse de la gallinaza, según el reporte de la FAO (2013a) a nivel mundial se han realizado numerosos trabajos de investigación sobre la forma de recuperar los nutrientes y productos orgánicos de valor agregado procedentes de los residuos animales, a fin de mejorar la eficiencia agrícola y mitigar los impactos ambientales.

- Aplicar sobre tierras de cultivo como fertilizante. – La contaminación se da cuando la aplicación de la gallinaza supera la capacidad del cultivo receptor para utilizar los nutrientes (Font-Palma, 2012), esto se ve afectado por los métodos de recogida, almacenamiento, manipulación, tratamiento, transporte y aplicación.
- El compostaje. – Es un proceso biológico aerobio natural de descomposición de la materia orgánica que representa un método práctico y económicamente viable para la estabilización de la gallinaza antes de su aplicación sobre las tierras de cultivo.
- Realimentación de los animales. – La investigación científica ha documentado que los nutrientes y energía procedentes de la gallinaza pueden reciclarse de forma segura como un componente de la dieta de los rumiantes, siempre y cuando se neutralicen los agentes patógenos.
- Producción de Bioenergía. – Debido a su composición la gallinaza puede convertirse en bioenergía, uno de los métodos más comunes para el manejo de la gallinaza mediante la limpieza con agua es la digestión anaerobia, que produce biogás, una ventaja adicional es que, dependiendo de las condiciones de procesamiento, los sólidos y líquidos del estiércol están más estabilizados y son más aceptables para su

uso como abono o suplemento alimenticio pero una situación económica desfavorable y otras cuestiones relacionadas con la viabilidad operativa y el bajo rendimiento del biogás han desalentado la aplicación de esta tecnología por parte de muchos productores de aves de corral de todo el mundo.

Las camas y la gallinaza secas pueden ser incineradas en hornos pequeños para la producción de calor dentro de las granjas o ser transportadas a centros donde se queman a gran escala para la generación de electricidad (Leeuw, 2016), lo cual es una alternativa prometedora ya que también significa una reducción en la emisión de gases de estos residuos (Font-Palma, 2012).

Los costos y beneficios económicos, la viabilidad operativa y los problemas relacionados con las emisiones son también factores que condicionan la implementación de esta tecnología. Sin embargo, el aumento de los costos de energía, la adopción en algunas regiones de una política medioambiental dirigida a lograr los objetivos previstos de producción de energía renovable y la evolución del mercado de créditos de carbono están incentivando el interés por todas las tecnologías de procesamientos de aves de corral y otros productos de desecho que producen bioenergía y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2013a).

Mucha de la investigación actual sobre el uso de biomasa como combustibles está enfocada en la formación de la cenizas y los mecanismos de depósito y aglomeración de la misma (Lynch, Henihan, Kwapinski, Zhang, & Leahy, 2013).

Lynch y otros (2013), generaron una ceniza de gallinaza a partir de una muestra tomada de una granja la cual calcinaron a 550 °C en condiciones de laboratorio, encontraron que se compone principalmente de óxidos de calcio (Tabla 1-1).

Tabla 1-1 Composición química de la gallinaza. Tomado de Lynch y otros (2013).

Componente	Porcentaje
SiO ₂	2.8
Al ₂ O ₃	0.6
Fe ₂ O ₃	1.2
CaO	21.0
MgO	11.0
P ₂ O ₅	19.0
K ₂ O	28.0

Acharya, Dutta, Mahmud, Tushar, & Leon (2014) analizaron la ceniza de gallinaza proveniente de un generador de energía confirmando que se compone principalmente de óxidos de calcio (Tabla 1-2).

Tabla 1-2 Composición química de la gallinaza. Tomado de Acharya y otros (2014)

Componente	Porcentaje
SiO ₂	2.69
Al ₂ O ₃	0.31
Fe ₂ O ₃	0.57
CaO	65.17
MgO	4.53
P ₂ O ₅	17.46
K ₂ O	6.36

La caracterización por Difracción de rayos X muestra contenidos de compuestos químicos que favorecen la actividad puzolánica (Figura 1-6).

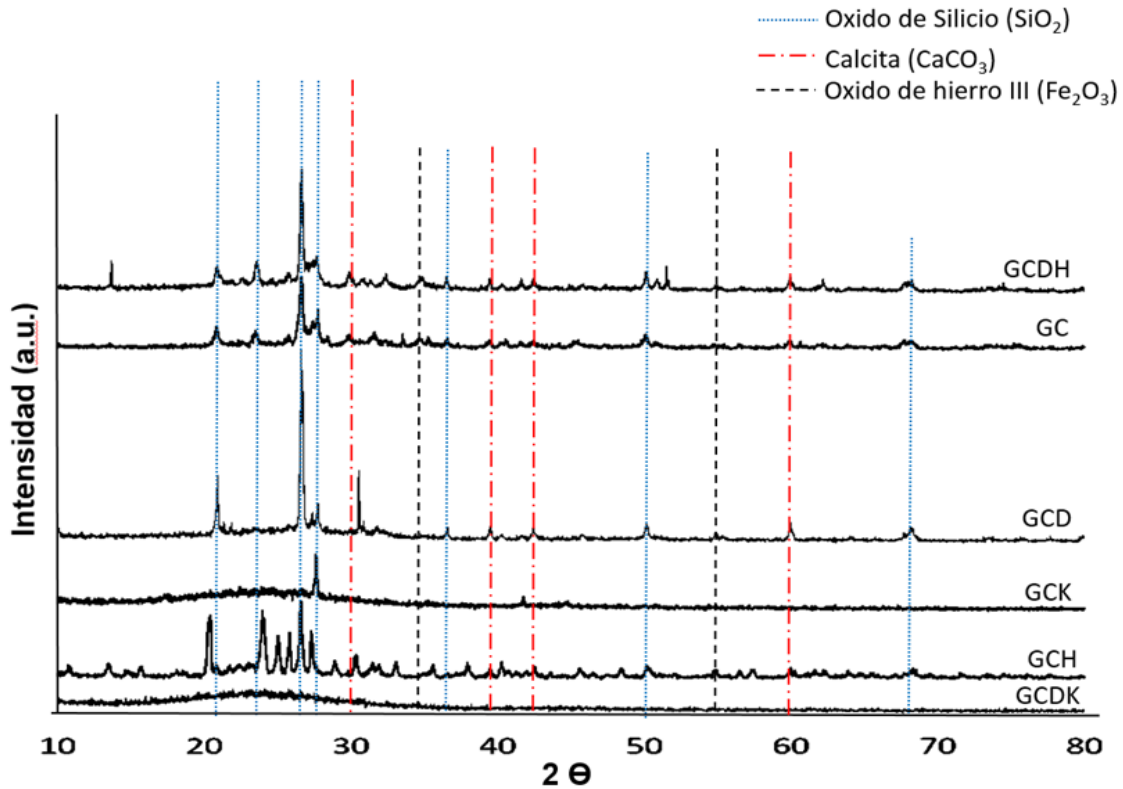


Figura 1-6 Difracción de rayos X de la ceniza de gallinaza. Tomado del archivo de la maestría en construcción del Instituto Tecnológico de Chetumal.

Todo lo anterior se resume en las conclusiones echas por Acharya y otros (2014), las cenizas de las muestras estudiadas contienen una significativa cantidad de sílice y calcio y pueden ser usadas para la producción de Cemento.

Formulación del Problema

¿Qué actividad puzolánica presenta la ceniza de gallinaza?

¿Qué porcentaje de Cemento se puede sustituir con ceniza de gallinaza?

¿Qué características físicas y mecánicas tiene una pasta de Cemento adicionado con ceniza de gallinaza?

Marco Teórico

Antecedentes de la Investigación

Los materiales cementantes suplementarios son investigados como una herramienta para mitigar el impacto ambiental de la industria cementera (Damineli, Pileggi, & John, 2013).

Los materiales cementante suplementarios son usados por ser aglomerantes, así como por sus propiedades puzolánicas. Los efectos físicos son principalmente asociados con su influencia en las características aglomerantes de la mezcla, la cual depende en el tamaño, forma y textura del grano (G C Cordeiro, Toledo Filho, Tavares, & Fairbairn, 2008). Los efectos químicos son asociados con su capacidad de proveer compuestos silicoaluminosos a la mezcla que reaccionarán con el hidróxido de calcio en presencia de agua (G C Cordeiro et al., 2008). Esto significa que las partículas de los materiales cementantes suplementarios se hidratan como el Cemento Portland, pero estas partículas solo suministran más silicatos en la mezcla que reaccionará con el exceso de hidróxido de calcio generado durante la hidratación del Cemento Portland (Imbabi et al., 2012).

Las puzolanas naturales se han utilizado desde la antigüedad, como los llamados “Cementos y morteros romanos” y las puzolanas artificiales como la escoria de alto horno desde hace más de 100 años; las primeras fueron adicionadas a la cal y formaron el cementante con el que están hechos edificios romanos, como el coliseo, que aún perduran en la actualidad, la segundas se han adicionado al Cemento portland mejorando su durabilidad e incluso el costo (Damineli et al., 2013).

Según Damineli (2013) los materiales cementantes suplementarios de mayor uso en la actualidad, las escorias de alto horno, las cenizas volantes, el humo de sílice, serán escasas para 2020 debido a que se espera un incremento en la producción de Cemento portland, por lo que el desarrollo de nuevos materiales suplementarios es una prioridad, así como entender el comportamiento químico y físico de los mismos, aunado a esto, la relativa escasez de los tradicionales materiales cementantes suplementarios o su localización, cuyo transporte causa un gran impacto económico y ambiental, promueven la búsqueda de nuevos materiales cementantes suplementarios y medios para evaluar la actividad puzolánica (Tironi, Trezza, Scian, & Irassar, 2013).

Estos materiales cementantes suplementarios deben cumplir tres condiciones que determinaran su éxito, primero, deben ser utilizables en el corto y largo plazo, segundo, debe haber suficiente información validando la capacidad de los productos y así puedan generar estándares de ingeniería para funciones específicas, desde hacer blocks huecos hasta mezcla para cimentaciones en sitio y tercero, que exista suficiente materia prima que pueda ser transportada en volumen a las plantas de procesamiento (Imbabi et al., 2012).

El uso exitoso como reemplazo parcial del Cemento Portland, contribuye a la solución del uso del suelo inadecuado y en la reducción del costo de los materiales de construcción (Madurwar, Ralegaonkar, & Mandavgane, 2013), proporcionando una solución satisfactoria a los problemas y cuestiones ambientales asociados con el manejo de residuos, ahorro de energía, y ayuda en la protección del ambiente ante la contaminación.

La cascarilla de arroz es una funda natural que se forma alrededor del grano de arroz durante su crecimiento. Está disponible en grandes cantidades dentro de los países productores de arroz y es considerado un residuo solido de la agricultura. La cascarilla de arroz no tiene un valor comercial. La industria del arroz es uno de los sectores más importantes en países como China, India, Indonesia, Malasia y Bangladesh, y en todo el mundo, para el final del 2013, la recolección de arroz se estimó en 742 millones de toneladas (Aprianti, Shafigh, Bahri, & Farahani, 2015).

La actividad puzolánica de la cascarilla de arroz depende del contenido de sílice, la fase cristalina de la sílice y del tamaño y área superficial de los granos de ceniza (Zain, Islam, Mahmud, & Jamil, 2011).

La ceniza de bagazo de caña es uno de los subproductos más generados en todo el mundo y puede ser usado como material cementante suplementario principalmente por su alto contenido de sílice (G C Cordeiro et al., 2008). El bagazo de caña es usado como combustible en la producción del azúcar (Ganesan, Rajagopal, & Thangavel, 2007). Los mayores productos de reacción entre el hidróxido de calcio y la ceniza de bagazo de caña son silicatos de calcio hidratados (C-S-H). Se ha observado un descenso en el contenido de cal libre en la pasta de Cemento y es asociado a la actividad puzolánica de la ceniza de bagazo de caña. La ceniza de bagazo de caña presenta una alta actividad puzolánica y puede producir un incremento en la resistencia cuando se utiliza como parte del aglutinante hidráulico. La reactividad puzolánica de la ceniza de bagazo de caña depende directamente de las condiciones en que se quema el bagazo (G C Cordeiro et al., 2008).

Los residuos agrícolas, como la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza de bagazo de caña, son materiales puzolánicos que pueden ser utilizados como materiales cementantes suplementarios (Aprianti et al., 2015).

Las propiedades de las cenizas provenientes de la agricultura dependen del tiempo de quemado, temperatura alcanzada, tiempo de enfriamiento y condiciones de molienda (Ganesan et al., 2007).

En busca de nuevos residuos agrícolas podemos encontrar investigaciones como la realizada por Nakanishi y otros (2014), se evaluó la actividad puzolánica de dos tipos del llamado pasto elefante, conocido en México como zacate, este pasto se calcino en condiciones controladas a 700°C. Las cenizas fueron tratadas químicamente con HCl para reducir el contenido de potasio, ambas cenizas presentaron alta actividad puzolánica después de 7 días de curado con cal saturada, el Análisis Termo Gravimétrico y el Análisis Micro-Raman confirmaron que los principales productos de reacción puzolánicas fueron C-S-H, de lo anterior concluyeron que puede ser utilizado como material suplementario.

Rodier, Bilba, Onésippe, & Arsène, (2017), estudiaron la actividad puzolánica de la ceniza del tallo del bambú, la calcinaron a 600°C por 3h en un horno, realizaron diferentes métodos para evaluar la actividad puzolánica, entre ellos la prueba de Chapelle, el método de cal saturada, Análisis Termo Gravimétrico y el Índice de resistencia, mediante espectrometría de rayos X (DRX y FRX), determinaron que las cenizas están principalmente compuestas de SiO₂ en fase amorfa, concluyendo que es posible utilizarlo como adición al Cemento.

En cuanto al uso de los excrementos de animales de la industria pecuaria se pueden encontrar diversos trabajos de investigación que sugieren que la combustión de estos para generar energía es una de las formas más favorables al medio ambiente y al desarrollo sustentable para la disposición final de estos.

La combustión es potencialmente el más atractivo método para disponer de los excrementos del ganado por diferentes razones: el corto tiempo que se toma comparado con la digestión anaerobia, el hecho de que se produce energía, protege al medio ambiente de la contaminación y es económica, existe investigación sobre el uso de los excrementos de ganado para generar energía sin proponer un uso a disposición adecuada de la ceniza resultante del proceso, a excepción de algunos autores que propusieron su uso en la industria del Cemento debido a que la composición química de la ceniza es parecida a la utilizada como material cementante suplementario (Zhou, Zhang, & Chen, 2012).

Zhou y otros (2012) determinaron la composición química de la ceniza de excremento de ganado por DRX y EDS y su microestructura fue determinada por SEM, se elaboraron prismas de mortero y fueron probadas para determinar el Índice de actividad puzolánica en comparación ceniza volante, encontrando una mayor actividad puzolánica en la ceniza del excremento de ganado.

En la literatura no se ha encontrado estudios sobre el uso de la ceniza de gallinaza como material suplementario cementante, se han encontrado investigaciones sobre la gallinaza y su uso para: fabricar carbón activado (Kongsomart, Li, & Takarada, 2015; Sato et al., 2013), para su uso en generadores de energía eléctrica (Billen, Costa, Van Der Aa, Van Caneghem, & Vandecasteele, 2015; Cotana et al., 2014; Keener, 2002).

Algunos otros han realizado la caracterización de la gallinaza como parte de sus investigaciones para gasificarla, los cuales fueron revisados por Font-Palma, (2012), destacando la siguiente composición típica de la gallinaza (Tabla 1-3).

Tabla 1-3 Análisis físico químico de la gallinaza. Tomado de Font-Palma (2002).

Componentes	Kirubakaran et al.	Reardon et al.	Antares Group Incorporated	Whitely et al.
HHV (MJ/kg)	9.56	13.99 (seco)	10.73;14.79(seco)	12.0
Análisis Aproximado				
Carbón fijado	10.2	14.0	9.8	8.11
Materia Volátil	50.3	62.2	47.3	54.72
Humedad	8.2	25.5	27.4	10.59
Ash	28.8	23.9	15.7	26.58
Análisis último (peso %)				
C	24.84	35.6	27.22	29.09
H	1.9	4.6	3.72	5.11
O	33.76	29.8	23.10	
N	2.5	5.3	2.69	3.44
S	2.5	0.9	0.33	0.8
Cl	2.5	-	0.71	
Ceniza	28.8	23.9	15.7	26.58
Humedad	8.2	-	27.4	10.59
Composición de las cenizas (peso%)				
SiO ₂	18.5	22.2	8.1	9.83
Al ₂ O ₃	3.1	2.9	1.9	1.36
TiO ₂	-	0.2	0.2	0.06
Fe ₂ O ₃	2.1	1.7	1.16	0.58
CaO	18.5	21.3	17.3	3.72
MgO	4.2	5.0	5.0	1.26
Na ₂ O	3.6	3.9	9.2	1.61
K ₂ O	-	-	16.3	3.34

P ₂ O ₅	25.7	20.2	24.4	4.23
SO ₃	5.2	7.0	6.7	1.91
BaO	-	-	-	-
SrO	-	-	-	-
CO ₂ /otros	-	0.3	9.4	-

Lynch et al., (2013) determinaron el tamaño de partícula (Figura 1-7) de las cenizas resultantes de un proceso de combustión burbujeante en lecho fluido (Bubbling Fluidized-Bed Combustor), en este proceso se produjeron cinco diferentes cenizas: cenizas de cama (BA), intercambiador de calor 1 y 2 (HE 1 y HE 2), ceniza de ciclón (CYC) y Ceniza de los filtros de manga (BH).

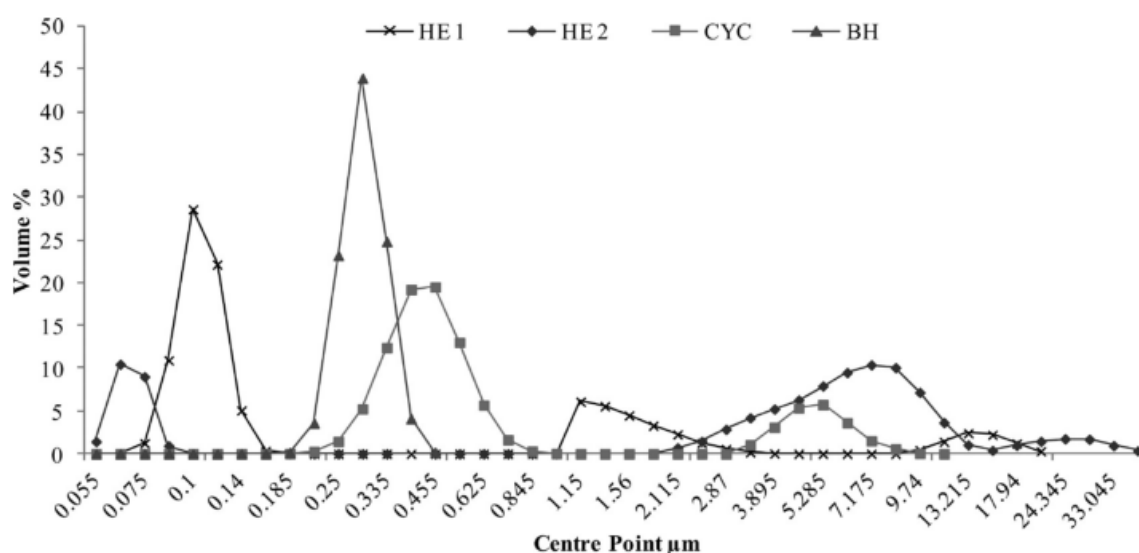


Figura 1-7 Tamaño de las partículas de diferentes cenizas de gallinaza. Tomado de Lynch et al., (2013).

Particularmente las cenizas HE 1, HE 2 y CYC muestran una distribución multimodal desde ceniza fina (< 2 μm) hasta ceniza gruesa (> 2 μm).

La morfología analizada (Lynch et al., 2013) mediante Micrografía Electrónica de Barrido (Tabla 1-4) de las cenizas HE 1 (Figura 1-8), HE 2 (Figura 1-9), consisten en grupos de partículas irregulares, junto con algunos cristales esféricos, la parte CYC (Figura 1-10) contiene tanto cristales de forma alargada como cristales esféricos, constituidos

primordialmente por K, Ca, Mg y P, con pequeñas cantidades de Na, S y Cl según lo descrito en la Tabla 1-5.

Tabla 1-4 Micrografías de distintas cenizas de gallinaza. Elaboración propia.

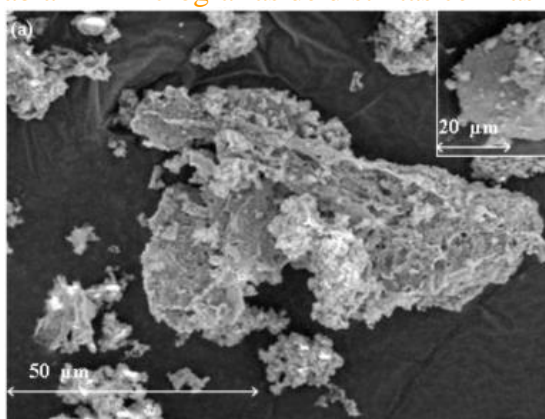


Figura 1-0-8 Micrografía de la ceniza HE1. Tomado de Lynch et al., (2013)

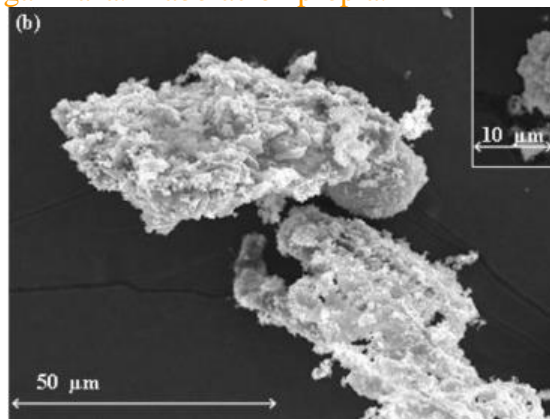


Figura 1-0-9 Micrografía de la ceniza HE2. Tomado de Lynch et al., (2013)

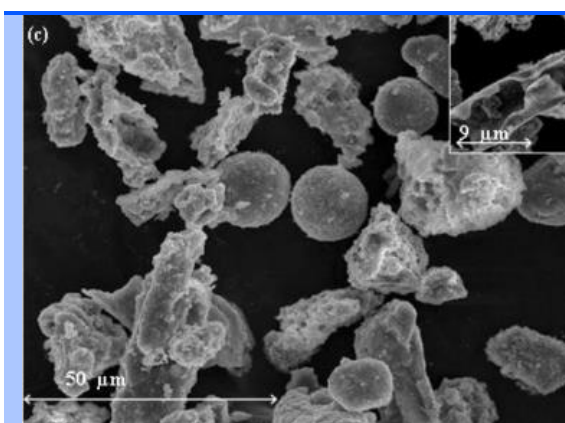


Figura 1-10 Micrografía de la ceniza CYC. Tomado de Lynch et al., (2013)

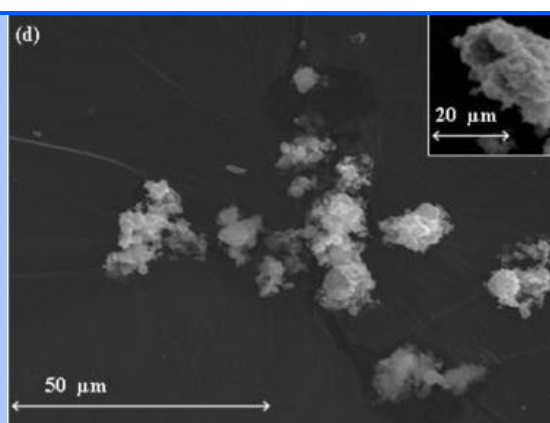


Figura 1-11 Micrografía de la ceniza BH. Tomado de Lynch et al., (2013)

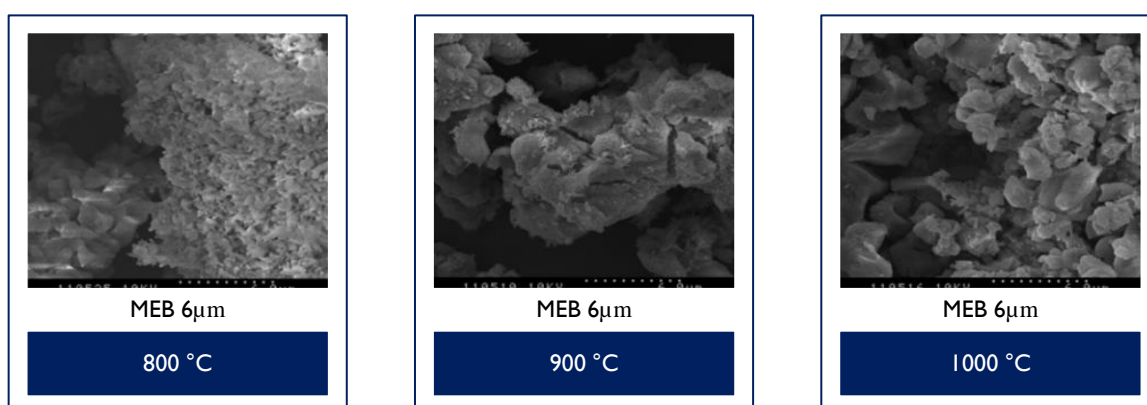
Tabla 1-5 Análisis EDX de las muestras de ceniza de gallinaza. Tomado de Lynch et al., (2013).

Elemento	Composición (peso%)			
	HE 1	HE 2	CYC	BH
Na	10.58	5.08	3.15	2.10
Mg	19.01	4.37	16.61	1.14
Si	3.69		3.89	0.14

P	23.78	11.23	16.33	1.36
S	2.12	6.67	3.57	11.15
K	17.38	45.58	26.52	55.29
Ca	22.88	14.69	23.01	2.88
Mn	0.57		4.59	
Cl		12.38	2.32	25.95

La morfología estudiada de las partículas que se forman debido a la calcinación fueron descritas por Acharya et al., (2014) a temperaturas de 800 °C, 900 °C y 1000 °C, se aprecia en la secuencia de imágenes obtenidas (Tabla 1-6) que la forma irregular de las partículas se va perdiendo, al incremento de la temperatura las partículas tienden a formarse en esferas.

Tabla 1-6 Micrografías de distintas cenizas de gallinaza. Tomado de Acharya et al., (2014).



Bases Teóricas

Cemento Portland

La industria cementera incorpora desperdicios y subproductos que contienen los mismos componentes utilizados para sustituir al Cemento implementado en el proceso de fabricación como material de adición o como combustible (Figura 1-12).

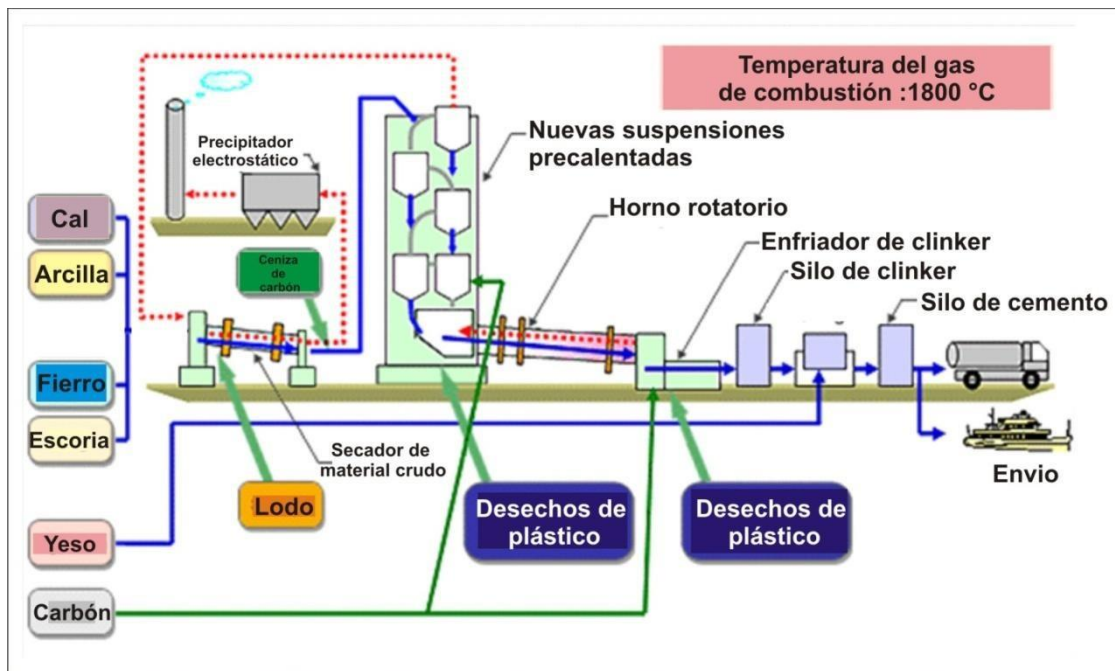


Figura 1-12 Diagrama de disposición y uso de materiales de desperdicio en la fabricación del Cemento Portland. Tomado Martínez Reyes, (2007).

Los procesos de fabricación de Cemento aseguran la calidad del producto final siendo resultado de controlar los estándares especificados durante la manufacturación, en México la normatividad vigente para la producción de los diferentes tipos de Cemento hidráulico y sus características comerciales se identifican en la Tabla 1-7 con base en la norma NMX-C414-ONNCCE.

Tabla 1-7 Composición del Cemento portland. Tomado de NMX- C414-ONNCCE.

Cemento		Clinker + Sulfato de Calcio	Componentes Principales (% en masa)				Características
Tipo	Denominación		Puzolana	Escoria Granulada de Alto	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	--	--	--	--	Provee velocidad de endurecimiento moderado
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	6-50	--	--	--	Reduce calor de hidratación. Se producen reacciones por incorporación de Puzolanas
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	--	6-60	--	--	Baja reactividad álcali-agregado
CPC	Cemento Portland Compuesto	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	Alta resistencia química y menor desprendimiento de calor.
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	--	--	1-10	--	Resistente a suelos salinos y ambientes químicamente
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	--	61-80	--	--	Baja resistencia inicial alta en edades tardías

En la Tabla 1-8 se identifican las especificaciones físicas con base a la clase de resistencia a la compresión, tiempo de fraguado con base al tipo de Cemento manejado en la norma NMX-C-062-ONNCE y la norma NMX-C414-ONNCCE.

Tabla 1-8 Especificaciones y tolerancias de Cementos hidráulicos. Tomado de NMX-C-062-ONNCE y la norma NMX-C414-ONNCE.

Tipo	Denominación	Clase de resistencia	Resistencia a compresión			Tiempo de fraguado	
			3 días	28 días		Inicial	Final
			Mínimo	Mínimo	máximo	Mínimo	máximo
CPO	Cemento Portland Ordinario	20		20	40	45	600
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30		30	50	45	600
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	20	30	50	45	600
CPC	Cemento Portland Compuesto	40		40		45	600
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40		40		45	600
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	40R	30	40		45	600

Puzolanas

La norma ASTM C-618 define a las puzolanas, como aquellos materiales sílico o sílico-aluminosos, los cuales por si solos poseen poco o nulo valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con la portlandita (hidróxido de calcio $\{Ca (OH)_2\}$ a temperatura ordinaria para formar compuestos con propiedades cementantes.

Existen puzolanas naturales y artificiales, hechas a base de arcillas activadas. La puzolana natural es un material volcánico, utilizada aproximadamente desde el año 79DC, sin embargo, el empleo de las cenizas volcánicas y de la arcilla calcinada en otras culturas data de 2000 AC o tal vez antes.

Las puzolanas artificiales, son subproductos de procesos industriales y requieren por consiguiente equipo para su disposición. En algunos casos se requiere un tratamiento para obtener la mayor reactividad de éstas, entre otras puzolanas artificiales pueden citar a la ceniza volante, proveniente de la quema del carbón utilizado en las plantas generadoras de energía eléctrica, el humo de sílice, proveniente de la industria de aleaciones de ferro-silicio, las escorias de fundición, provenientes de la industria metalúrgica y ceniza de la quema de la cascarilla de arroz (Pontes, Silva, & Faria, 2013).

Las puzolanas artificiales pueden ser divididas en dos grupos: uno formado por materiales naturales, generalmente silicatos de naturaleza arcillosa y esquistosa que, carentes de actividad puzolánica, adquieren ésta por un tratamiento térmico adecuado, generalmente calcinación; y un segundo grupo constituido por subproductos de producciones industriales que adquieren estas propiedades como resultado de transformaciones químicas y estructurales durante procesos en los cuales, generalmente, están presentes temperaturas elevadas (Donatello, Tyrer, & Cheeseman, 2010)

Los materiales que tienen la capacidad necesaria para cumplir con los requisitos de la definición anterior son muy numerosos y pueden clasificarse en dos grupos (Tabla 1-9):

Tabla 1-9 Clasificación de materiales con Capacidad Puzolánica. Tomado de CFE (2001).

Puzolanas naturales (crudas o calcinadas)	Tierras diatomáceas, Cenizas, arenas, tobas y rocas vítreas volcánicas. Rocas silíceas diversas, de origen ígneo, sedimentario y metamórfico.
Puzolanas artificiales (subproductos industriales)	Cenizas volantes, Hollín de sílice (micro sílice) Ladrillo molido Escoria granulada de alto horno

Existen dos modos básicos de emplear las puzolanas en el concreto, ya sea formando parte de un Cemento Portland-Puzolana, o bien dosificándolas por separado durante la elaboración de las mezclas.

Las puzolanas naturales más comúnmente empleadas hoy en día son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperaturas en los hornos y después se muelen hasta que se transforman en un polvo fino, estos materiales incluyen arcillas calcinadas.

En las especificaciones y clases de los materiales cementantes suplementarios en los Estados Unidos las puzolanas naturales crudas o calcinadas, incluyen: tierras diatomáceas (tobas), sílex opalino, esquisto, tufo, cenizas volcánicas o pumitas (piedra pómez), incluyendo meta caolinita, entran todas ellas en puzolanas naturales clase N (M C G Juenger, Winnefeld, Provis, & Ideker, 2011).

En Europa, la norma EN197 identifica dos tipos de Cemento Portland compuesto de acuerdo con el nivel de reemplazo por material suplementario (escoria, humo de sílice, puzolanas naturales, ceniza volante, caliza), el tipo II/A-M conteniendo de 6 a 20% y el tipo II/B-M conteniendo 21 a 32%. En algunos países de Latinoamérica, también están normalizados los Cementos compuestos. En Brasil, la norma EB-2138/91 define dos tipos de Cemento Portland compuesto, el tipo CPII-E que contiene hasta 34% de escoria y hasta un 10% de material calcáreo, y el tipo CPII-Z conteniendo hasta 14 % de material puzolánico y un 10 % de material calcáreo. En México también se encuentran normalizados estos tipos de Cementos a través de la norma NMX C-414-0/99, además estos materiales están cubiertos por las especificaciones normativas de la Standard

Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete (ASTM C 618-00).

En la Figura 1-13 se observa la clasificación de materiales con potencial puzolánicos con base en la reactividad, clasificándolos en cuatro grupos de materiales cementantes y puzolánicos. En México, las puzolanas solo son utilizadas para la fabricación de Cemento Puzolánico, moliendo conjuntamente el Clinker y el material puzolánico, empleándose puzolanas clase N, ASTM C 618.

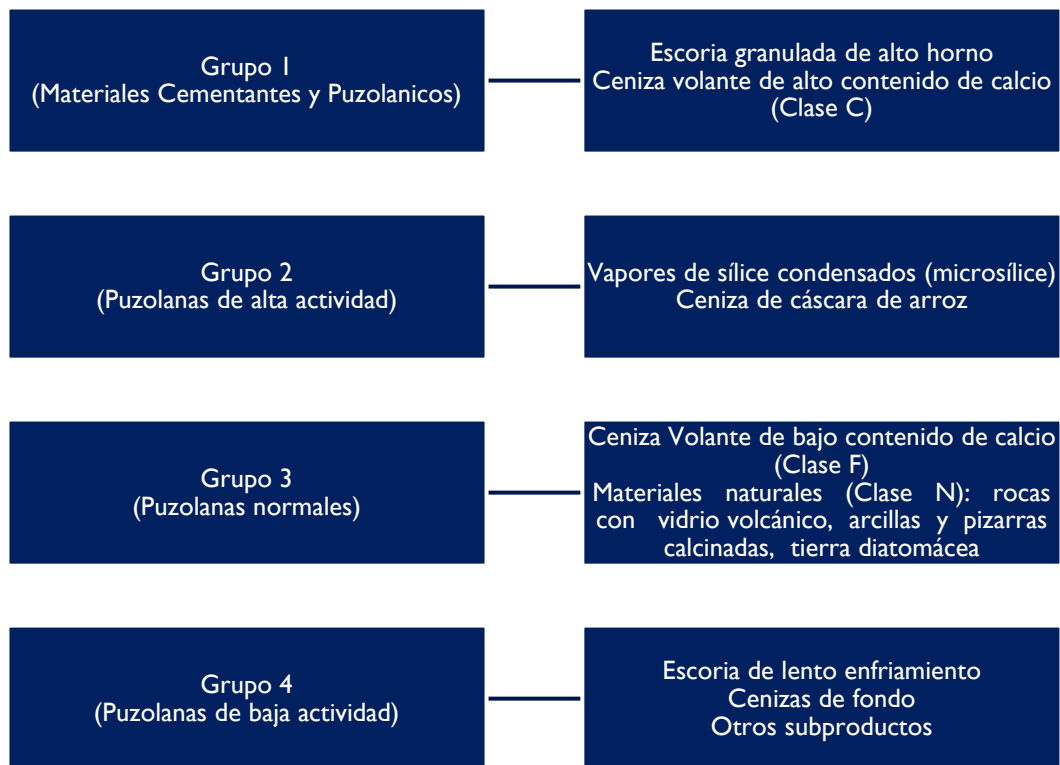


Figura 1-13 Clasificación de materiales con potencial puzolánico.

Para determinar si un material tiene propiedades puzolánicas se determina el Índice de Actividad Hidráulica el cuál se mezcla con Cemento portland y durante la hidratación, el Cemento Portland producirá portlandita, reaccionando con la puzolana para producir compuestos de C-S-H.

La reacción entre una puzolana y el hidróxido de calcio es llamada la reacción puzolánica. La importancia técnica de los Cementos de puzolana se deriva principalmente de tres aspectos de la reacción puzolánica.

Primero, la reacción es lenta; por lo tanto, las velocidades de liberación del calor y el desarrollo de resistencia serán consecuentemente lentos.

Segundo, la reacción es consumidora de cal en lugar de producirla y el desarrollo de resistencia será consecuentemente lento.

Tercero, los estudios de la distribución del tamaño del poro de Cemento hidratado han demostrado que los productos de la reacción son muy eficaces en el llenado de grandes espacios capilares, mejorando la resistencia y la impermeabilidad del sistema

Los materiales cementantes suplementarios (SCMs) son puzolanas finamente divididas siendo las de mayor utilización: ceniza volátil, humo de sílice, metacaolín y escoria granulada de alto horno que son usadas en mezclas de Cemento Portland como reemplazo parcial o total. Los SCMs pueden ser divididos dentro de dos categorías basadas en el tipo de reacción: hidráulicos o puzolánicos. Los materiales hidráulicos reaccionan directamente con agua para formar los compuestos cementantes, mientras los materiales puzolánicos reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, generando productos de hidratación solubles en la presencia de humedad (Lothenbach, Scrivener, & Hooton, 2011).

Para caracterizar materiales con posible actividad puzolánica se emplean métodos químicos, físicos y mecánicos. Los parámetros para evaluar la actividad puzolánica de un material son: tiempo de curado, temperatura de curado, relación agua/Cemento, proporción de puzolana en el conglomerante y tipo de Cemento entre otros. El efecto de la reacción puzolánica en morteros de Cemento/puzolana consiste en el desarrollo de la resistencia mecánica es superior a la esperada debido a la relación agua/Cemento existente en la dosificación de dicho conglomerado (Damineli et al., 2013).

Las nuevas tendencias mundiales han conducido a que diversos factores puedan conjugarse para la implementación de materiales de reemplazo o suplementarios de Cemento Portland. Las ventajas que aportan con su incorporación se pueden resumir en tres aspectos generales:

Económico: Los materiales empleados son de menor costo o son materiales de desecho de un proceso o subproductos, usado como Cemento resulta en una disminución en los costos de producción.

Ecológico: Permiten la eliminación de acumulación de desechos que generan contaminación en los estratos del suelo, convirtiéndolos en un material útil al añadirlos en la producción de Cemento.

Tecnológico: El reemplazo parcial del Cemento Portland por desechos o materias primas de bajo costo benefician positivamente las propiedades mecánicas y la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

Ceniza de cáscara de arroz

La ceniza de cáscara de arroz (CA) es un subproducto agrícola que es empleado comúnmente como combustible, este material contiene un 95% de SiO_2 , 1-2% de K_2O y el resto esencialmente de carbón no eliminado, teniendo un área superficial de 50 a 60 m^2/kg ((Zhang, Lastra, & Malhotra, 1996)). Trabajos realizados por Bajpai y Dalai consideran la extracción alcalina de SiO_2 de la ceniza de cascara de arroz con el objeto de fabricar zeolita.

El control del quemado de la cascarilla de arroz permite controlar la cantidad de fase amorfa presente. A 100°C desprende el agua absorbida, a 350°C se pierden los componentes volátiles e inicia la combustión. Entre 400°C y 500°C el carbón residual se oxida y ocurre la mayor pérdida en peso; la sílice presente está en estado amorfo. Por encima de los 600°C se empieza a detectar cuarzo. Incrementando la temperatura de combustión se forman distintos polimorfos de cuarzo y se incrementa la cantidad de materia cristalina, reduciendo potencialmente la reactividad.

Cenizas Volátiles (Ceniza Volante)

Los combustibles fósiles como el carbón se utilizan en centrales eléctricas modernas del mundo para producir energía eléctrica. El residuo inorgánico remanente después de la combustión (aproximadamente 1500 °C) del carbón finamente pulverizado (tamaños de partícula de 10-100 μm o incluso más finos una superficie esférica entre 250 m^2/kg y 600 m^2/kg) se conoce como ceniza. Alrededor del 80% de la ceniza producida es arrastrada por la corriente de gases y es posteriormente recolectada; por la naturaleza de su generación, a este subproducto se le denomina ceniza volátil. En 2010 la producción de

ceniza de carbón mundial se estimó en 600 millones de toneladas de las cuales entre un 75 y 80% son consideradas cenizas volantes (Ahmaruzzaman, 2010).

Se estima que cerca del 20% de las partículas de la ceniza volátil son huecas y que, debido al rápido enfriamiento de la ceniza, ésta adquiere una cierta cantidad de fase vítrea metaestable (Ahmaruzzaman, 2010)

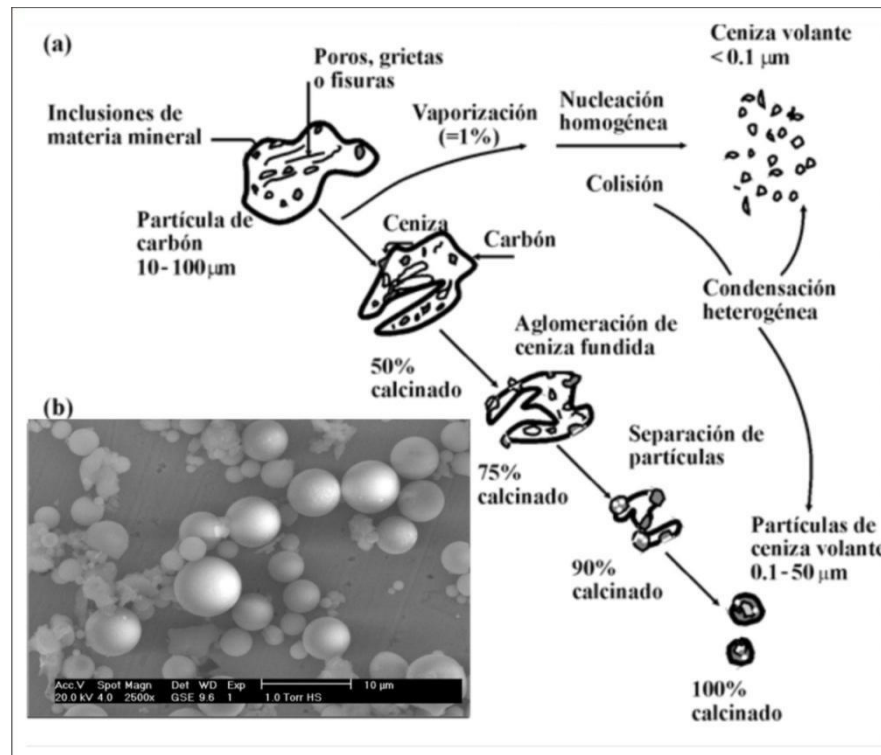


Figura 1-14 Proceso de combustión del carbón y formación de ceniza volátil. Tomado de (Martínez Reyes, 2007).

Para identificar la diferencia entre la ceniza “C” y las cenizas “F”, indican que las primeras, por contener anhídrita y sulfatos alcalinos, por una parte, y aluminato tricálcico por otra, pueden facilitar la formación diferida de etringita secundaria expansiva en las pastas de Cemento y en los concretos. Además, por contener cal libre y periclusa, la hidratación a más o menos largo plazo de ambas puede contribuir también a la expansión, si bien por otros mecanismos. Esto no sucede o, en todo caso, no ocurría en mucha menor medida en las cenizas “F”, por lo cual se puede determinar que las cenizas “F” son mucho más estables que las cenizas “C” (Papadakis, 1999).

Siguiendo esta línea del aprovechamiento de estas propiedades, y con el fin de obtener mejores prestaciones, se ha estudiado la influencia de la adición de la ceniza volátil sobre el desarrollo de las fases de la lechada. La novedad de incluir ceniza volante en reemplazo de parte del Cemento junto a los demás componentes permite obtener cementantes, morteros y concretos con características particulares de baja permeabilidad, resistencia estructural temprana y alta resistencia al ataque de soluciones ácidas y alcalinas (Tsimas & Moutsatsou-Tsima, 2005).

Escoria de alto horno

La escoria de alto horno (EAH) es un compuesto de óxidos producido en la elaboración de arrabio o hierro primario en las plantas siderúrgicas. Se forma como un líquido alrededor de 1500°C y es producto de las reacciones entre el óxido de calcio adicionado como fundente, óxidos de silicio y aluminio inherentes en los minerales de hierro. La operación de un alto horno corresponde a un proceso químico-metalúrgico que implica reacciones de reducción para obtener metal fundido. Los materiales básicos empleados para fabricar arrabio son minerales de hierro, coque y fundente (caliza), los cuales interactúan en un sistema a contracorriente dentro del horno para la formación del hierro; los gases reductores se forman en la parte inferior del horno y a medida que avanzan hacia la parte superior van convirtiendo a los minerales de hierro en metal fundido y escoria.



Figura 1-15 Escoria de alto horno granulada. Tomada de (Martínez Reyes, 2007).

La escoria posee un bajo punto de fusión y una densidad menor que el metal fundido (de 2880 a 2960 kg/m³), las fases cristalinas que pueden formarse en una escoria son Melilita, que es una solución sólida de Ghelenita (C₂AS) y Akermanita (C₂MS₂), Diópsido (CMS₂), -C₂S, etcétera. La cantidad de fases cristalinas formadas depende de las condiciones de enfriamiento.

La escoria de alto horno se clasifica de acuerdo con su tipo de enfriamiento en:

Escorias enfriadas al aire: Es el material que resulta de la solidificación de escoria fundida bajo condiciones atmosféricas; el enfriamiento puede ser acelerado por la aplicación de agua a la superficie de solidificación.

Escorias pele tizadas: La escoria fundida es primeramente enfriada con agua y posteriormente secada al aire mediante un tambor rotatorio el cual gira aproximadamente a 300 rpm.

Escorias granuladas: es un material granular vítreo formado cuando la escoria fundida es rápidamente enfriada mediante un chorro de agua a alta presión, dando como resultado un material arenoso y con una humedad del 30% aproximadamente, el cual posteriormente se seca y muele para ser llamado escoria de alto horno granulada.

La escoria es un material potencialmente activo desde el punto de vista hidráulico, en la medida en que contiene constituyentes iguales o semejantes, a los que se integran en el Clinker de Cemento Portland. Por lo tanto, escorias y Clinker son perfectamente compatibles por los álcalis que se encuentran en el Clinker como sodio y potasio en disolución sólida con aluminato tricálcico y silicato dicálcico o en forma de sulfatos alcalinos. Además del yeso (sulfato cálcico) en diversas formas (dihidrato y/o hemihidrato y/o anhidrita)- que contiene el Cemento como regulador del fraguado.

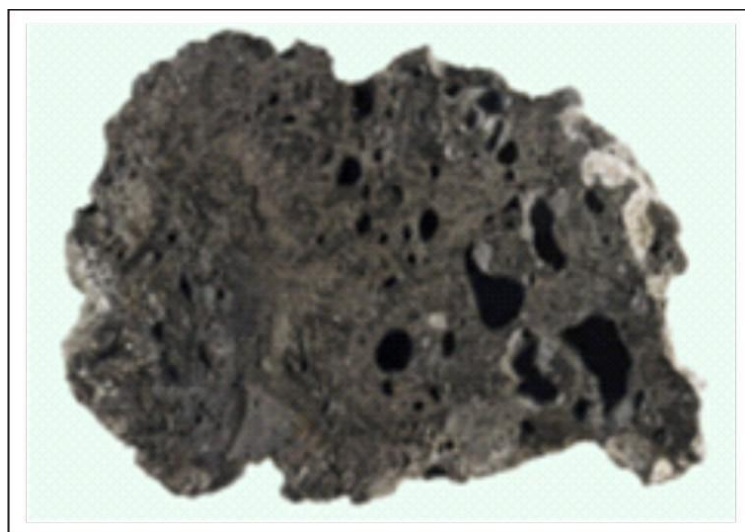


Figura 1-16 Escoria de alto horno enfriada al aire. Tomada de (Martínez Reyes, 2007).

Humo de sílice

El humo de sílice (Hs) es un producto secundario de la fabricación de silicio o ferro silicio a partir de cuarzo de alta pureza y carbón en un horno de arco eléctrico sumergido. Las partículas tienen un diámetro del rango de $0.03\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$ y una superficie específica de $20\,000\text{ m}^2/\text{kg}$ teniendo una densidad de 200 a 300 kg/m^3 y un peso aparente de 500 a 700 kg/m^3 .

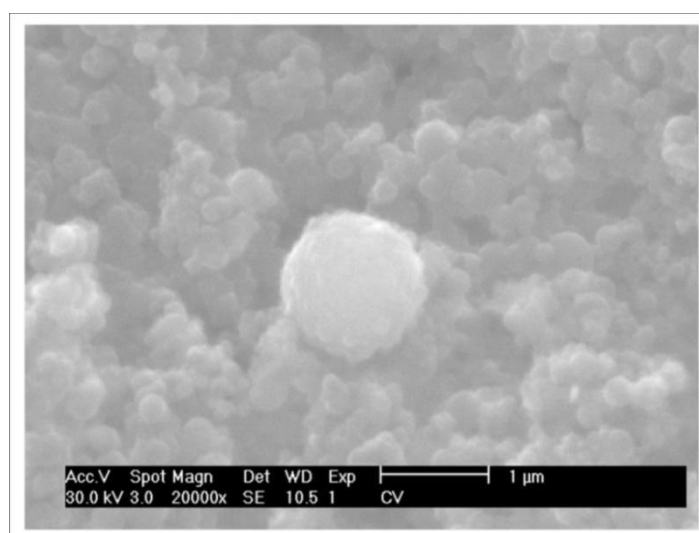


Figura 1-17 Partícula de humo de sílice. Tomado de (Martínez Reyes, 2007).

El SiO gaseoso que escapa se oxida y se condensa en la forma de partículas esféricas extremadamente finas de sílice amorfo (SiO_2), la sílice en forma de vidrio (amorfa) es altamente reactiva y la pequeñez de las partículas acelera la reacción con el hidróxido de calcio. La incorporación del humo de sílice se efectúa en lugar de cuatro o hasta cinco partes de Cemento Portland por masa; con un máximo de 3 a 5 por ciento de humo de sílice. Los beneficios adicionales del reemplazo por humo de sílice son: sangrado reducido, mayor cohesión de la mezcla, y principalmente alta resistencia temprana o baja permeabilidad.

En el caso del humo de sílice, después de tres días de curado, en sustituciones del 5 y 10% la hidratación de la alita es retardada y después de 28 días de curado esta reacción se acelera, finalmente esto es debido al gran calor de hidratación que genera a edades tempranas.

Metacaolín

Las arcillas han sido los materiales preferidos por el hombre para la manufactura de utensilios de cocción, farmacéutico, edificación, en materiales poliméricos y en convertidores catalíticos.

Las arcillas las constituyen partículas de tamaños de inferior a 2 micras en forma de bastones o platos que en su superficie pueden fijar agua. Un grupo principal de arcilla lo forma la caolinita cuya composición química corresponde a 45% sílice por 38% alúmina y 14% de agua (Sabir, Wild, & Bai, 2001).

Los minerales arcillosos adquieren actividad puzolánica mediante calentamiento a temperatura entre 600°C y 900°C. El tratamiento elimina el agua absorbida en la arcilla y resulta en la formación de una estructura colapsada cuasi forme que es reactiva hacia sustancias alcalinas. Al aumentar gradualmente la temperatura se pierde el agua ubicada entre las capas de arcilla (Sabir et al., 2001).

El tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales, que llevan a la obtención de metacaolín ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) o mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). De estos productos el metacaolín (MK), obtenido bajo un proceso de tratamiento térmico controlado del caolín a una temperatura alrededor de 600 °C donde se obtiene la mayor cantidad de fracción amorfa

y a temperatura mayor de calcinación (850 - 950 °C) se obtiene una formación de fase cristalina como mulita y alúmina las cuales reducen la reactividad (Tironi et al., 2013)

El beneficio del empleo del metacaolín en pastas de Cemento consiste en el aceleramiento del proceso de hidratación del Cemento, consumiendo hidróxido de calcio y llenando los espacios porosos en la matriz de la pasta hidratada (Tironi et al., 2013).

Las características más importantes que aporta el metacaolín, al ser incorporado en las mezclas de mortero y concreto, está en el incremento de la resistencia mecánica (compresión y flexión), la reducción de la permeabilidad y la porosidad capilar, el incremento en resistencia frente al ataque químico, la posibilidad de prevenir la reacción álcali – agregado, el control del agrietamiento, al igual que por su color blanco mejora la apariencia de los productos finales.

Hidratación del Cemento Portland

La hidratación es el proceso por el cual una suspensión fluida es transformada en un sólido rígido a temperatura ambiente, sin la necesidad de calor u otros agentes externos y con una mínima cantidad de cambio en el volumen (Scrivener & Nonat, 2011).

Para lograr progreso en los más importantes retos que enfrenta el mundo el día de hoy, la necesidad de reducir el impacto ambiental y hacer más con menos, es particularmente importante entender los mecanismos que gobiernan la hidratación del Cemento, ya que pueden dirigir el camino a la incorporación de mayores cantidades materiales cementantes suplementarios o el desarrollo de nuevos Clinkers (Scrivener & Nonat, 2011).

Los compuestos de los diferentes tipos de Cemento pueden reaccionar con el agua de dos formas distintas. En la primera, se produce una adición directa de algunas moléculas de agua, lo cual constituye una reacción de hidratación real. El segundo tipo de reacción con agua es la hidrólisis. Sin embargo, por utilidad y por costumbre, se aplica el término hidratación a todas las reacciones de Cemento con agua (Neville & Brooks, 1987).

En la industria del Cemento Portland, conocer la composición química de la materia prima, de los productos intermedios y del producto final es de vital importancia, tanto para el desarrollo del proceso de fabricación como para obtener un producto que cumpla con las especificaciones técnicas esperadas, lo que deriva en un conocimiento más real de los mecanismos de generación de propiedades como la resistencia y la durabilidad, las cuales son unas de las más importantes cuando se trata de seleccionar un Cemento para una aplicación específica. El proceso de hidratación ocurre de manera diferente en cada mineral ya sea por la velocidad de reacción, o por los cambios cristalinos experimentados por éstos durante la transformación de fase anhidra a hidratada (Giraldo & Tobón, 2006). El Cemento Portland anhidro es un polvo gris que consiste en partículas angulares dentro del rango de 1 a 50 μ m (Metha & Monteiro, 1998), es definido por la norma ASTM C150 como un conglomerante hidráulico producido al pulverizar el Clinker que consiste en silicatos de calcio, juntamente con sulfato de calcio. Los principales óxidos presentes en la materia prima son CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ (Tabla 1-10). Los cuatro compuestos principales corresponden al 90% de la masa del Cemento. El Cemento gris contiene como elementos

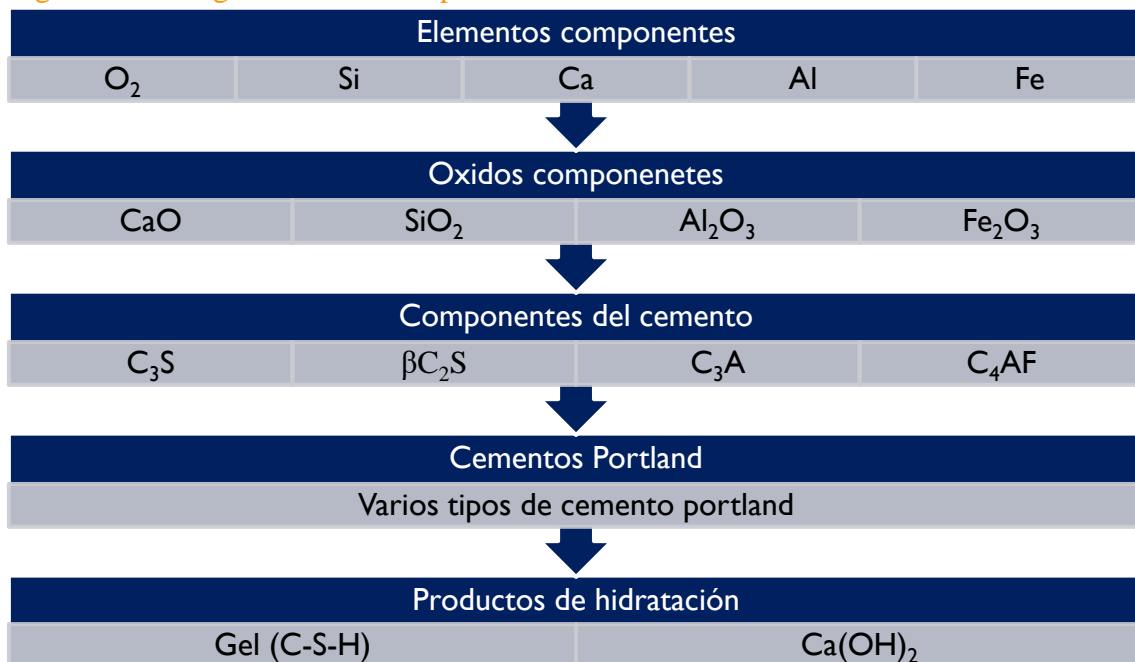
al calcio, silicio, aluminio y hierro, formando las fases mineralógicas C_2S (Ca_2SiO_4), C_3S (Ca_3SiO_5), C_3A ($Ca_3Al_2O_6$) y C_4AF ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$). El Cemento blanco contiene como elementos básicamente al calcio y al silicio sin contener al hierro, presentes en fases mineralógicas como C_2S y C_3S (Sandoval, 2012).

Tabla 1-10 Compuestos principales del Clinker

Óxid	Abreviatura	Compuesto	Abreviatura	Nombr
CaO	C	$3CaO.SiO_2$	C3	Silicato tricálcico
SiO ₂	S	$2CaO.SiO_2$	C2	Silicato dicálcico
Al ₂ O ₃	A	$3CaO.Al_2O_3$	C3	Aluminato tricálcico
Fe ₂ O ₃	F	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O$	C4A	Ferro aluminato tetracálcio

El fraguado y el endurecimiento del Cemento Portland ocurre como resultado de la reacción de hidratación entre los compuestos del Clinker, el yeso y el agua, la cual genera calor que es conocido como calor de hidratación (Sandoval, 2012).

Figura 1-18 Diagrama de los compuestos del Cemento



En el Cemento hay otras sustancias en pequeña proporción, como son: álcalis, que suelen provenir de las impurezas feldespáticas de las arcillas; MgO, aportado por arcilla o la caliza, y peligroso por encima de cierto límite (legalmente un 5%) por la lentitud con que se hidrata

la magnesia calcinada y la dilatación que la acompaña; CaO libre, otros componentes menores son TiO y PO.

La hidratación del Cemento es función de las reacciones entre los principales minerales del Cemento (C_3S , C_2S , C_3A , y C_4AF) y el agua, además, de la presencia de yeso y otros aditivos. Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados (Tabla 1-11).

Tabla 1-11 Compuestos (fases del Clinker) en el Cemento Portland ordinario. Tomado de (Sandoval, 2012)

Compuesto	Fórmula	%Masa	Características de hidratación
C_3S (alita)	$3(CaO)SiO_2$	42-66	Rápida, calor moderado
C_2S (belita)	$2(CaO)SiO_2$	9-30	Lenta pero constante, calor bajo
A(aluminato)	$3(CaO)Al_2O_3$	6-14	Muy rápida, calor muy alto
C_4AF (ferrita)	$4(CaO)Al_2O_3Fe_2O_3$	1-12	Calor moderado
Na_2SO_4/K_2SO_4			En la superficie del Clinker
	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Yeso) $CaSO_4$ $\frac{1}{2}$ H_2O (Hemihidrato) $CaSO_4$ (Anhidrita)	~5	Controla el tiempo de fraguado, el SO_4 soluble retarda el endurecimiento del C_3A y C_4AF

Interrelación de los compuestos en la fase del proceso de hidratación

Silicato tricálcico (C₃S)

La hidratación de la alita y la belita produce una familia de silicatos cálcicos hidratados, de estructura similar, denominados “gel C-S-H”, que son los responsables del fraguado y resistencia, así como de la estabilidad dimensional de la pasta de Cemento hidratado; además dichas reacciones forman portlandita (Ca (OH)₂ o CH), la cual es la base de la reacción puzolánica.

La alita es una solución sólida de silicato tricálcico (C₃S) con forma tetraédrica dopada con impurezas iónicas. 50% y al 70% del Clinker. Es la fase principal y más importante del Cemento Portland, controla el fraguado y el endurecimiento. Su hidratación es rápida, pero varía en función de la cantidad de iones en solución (Giraldo & Tobón, 2006). El C₃S es el silicato cálcico más inestable de los presentes en el Cemento, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como gel de tobermorita, y en hidróxido de calcio.

Silicato dicálcico (C₂S)

La belita es una solución sólida de silicatos dicálcico (C₂S) polimórfica, dopada con impurezas iónicas 15% al 30% del Clinker. El silicato dicálcico al hidratarse también se convierte en gel de tobermorita, y en hidróxido de calcio, pero a diferencia de la primera se produce menos hidróxido de calcio (Sandoval, 2012).

Aluminato tricálcico (C₃A)

Tiene una estructura cúbica, en presencia de cantidades de álcalis puede tener modificaciones a ortorrómbica o monoclinica. Genera mayor calor de hidratación y esta depende también de la cantidad y calidad de los iones alcalinos. La reacción del C₃A puro con agua es muy violenta y lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, conocido como fraguado relámpago. La hidratación de esta fase es afectada por la disolución de los sulfatos. Contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas. Un efecto positivo del C₃A es su capacidad de adherencia de cloruros. La solución sólida de C₃A se encuentra presente entre un 5% al 10% en el Clinker (Sandoval, 2012).

El aluminato tricálcico (C_3A - aluminato) al combinarse con yeso y agua produce la etringita. Además, el aluminato de calcio con la etringita y con agua se convierte en monosulfato. El aluminato de calcio (C_3A) con el hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado (Sandoval, 2012).

Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF)

Representa en masa el 1% al 12% del Clinker, forma productos similares a los del C_3A , donde el hierro sustituye parcialmente la alúmina en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado para la reducción de la temperatura de fraguado del Cemento. Contribuye muy poco para la resistencia, el principal efecto es el de color para la producción del Cemento gris .

Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H)

Representa un 50 a 60% del porcentaje de masa del Clinker, su morfología varía desde fibras pobremente cristalinas a una red reticular. Las propiedades físicas de los hidratos de calcio revisten interés en relación con las propiedades de fraguado y endurecimiento del Cemento . En su estructura pueden quedar embebidos iones como Mg^{2+} , Al^{3+} , K^+ , Na^+ o SO_4^{-2} (Valdez, 2002). El silicato es el responsable de la armazón interna de la pasta de Cemento, de la adherencia de ésta con los agregados en los morteros y concretos, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados (Calleja, 2001) por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo. (Giraldo, 2006).

Hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$)

En conjunto la alita como la belita producen los mismos tipos de silicatos de calcio hidratado (H-S-C) y son las principales fases generadoras de la portlandita ($Ca(OH)_2$), la cual es la base de la reacción puzolánica (Scrivener, Juilland, & Monteiro, 2015). Los hidróxidos de calcio constituyen del 20 al 25% de los sólidos en la pasta, formando grandes cristales con una morfología hexagonal. La portlandita no aporta ningún beneficio a la resistencia mecánica de la pasta de Cemento y puede producir espacios porosos pudiéndose lixiviar y salir del concreto, por esta razón se busca hacerla reaccionar con la puzolana y convertirla en un producto más resistente (Scrivener & Nonat, 2011).

La presencia de una cantidad considerable de hidróxido de calcio en el Cemento hidratado tiene un efecto adverso en la durabilidad química frente a soluciones ácidas, debido a que la solubilidad del hidróxido de calcio es mayor que la del C-S-H (Metha & Monteiro, 1998). Además de la solubilidad en agua y facilidad de lixiviarse por disolución; puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer material en descomponerse a altas temperaturas (600°C) en caso de incendio generando el desplome de la estructura (Martínez Reyes, 2007). Varios de estos aspectos negativos pueden controlarse con la adición de puzolanas (cenizas volantes, humo de sílice, escoria de hornos, etc.).

La disolución del hidróxido de calcio ocurre cuando el agua fluye por las grietas y por el sistema capilar del concreto. Durante su proceso de hidratación los Cementos Portland liberan del 15 al 30 % de hidróxido de calcio del peso del Cemento original.

Sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Ocupa de un 15% a 20 % del volumen de los sólidos en la pasta hidratada (Metha & Monteiro, 1998). Se conoce como anhidrita (sulfato de calcio anhidro), yeso (sulfato de calcio dihidratado) o hemidrato, comúnmente llamado yeso de parís (sulfato de calcio hemidrato), se adiciona durante la molienda final. Reacciona con el C_3A formando etringita controlando la hidratación del C_3A .

Trisulfoaluminato de calcio (AF_t)

La etringita es una forma de sulfoaluminatos de calcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), se encuentra en cualquier parte del Cemento. El sulfato está presente, en los materiales cementantes suplementarios y en los aditivos. Uno de los materiales que es fuente de sulfato de calcio es el yeso que se adiciona con propósitos para prevenir el fraguado rápido y para mejorar la resistencia. Este mismo material y otros compuestos de sulfatos reaccionan con el aluminato de calcio en el Cemento y forman etringita.

Los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da a la pasta hidratada mayor cohesión, ya que se trata de la etringita

positiva, pues la que genera expansión se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades tardías (mayores a 28 días) (Thomas et al., 2011).

Los cristales de etringita en los vacíos de aire y en las fisuras son típicamente de dos hasta cuatro micrómetros en sección transversal y de veinte hasta treinta micrómetros de largo (Giraldo & Tobón, 2006).

En un periodo de 24 horas los sulfatos en el Cemento se consumen para formar etringita o monosulfoaluminato, en dicha etapa la etringita se dispersa uniformemente en un nivel submicroscópico conociéndose como etringita primaria. Posteriormente la etringita se puede disolver lentamente y volver a formarse en áreas menos limitadas generando cristales de etringita blanco en forma de aguja forrando los vacíos de aire; normalmente se le conoce como etringita secundaria.

La expansión retardada por calor inducido (ERCI), también llamada de formación retardada de etringita (FRE), se refiere a una condición rara de ataque de sulfatos internos a través de la cual el concreto maduro se expande y se fisura. Esto puede ocurrir pues las altas temperaturas descomponen cualquier etringita que inicialmente se forme y retiene fuertemente el sulfato y la alúmina en el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) de la pasta de Cemento impidiendo la formación normal de etringita. En presencia de humedad, el sulfato se libera del confinamiento del C-S-H y reacciona con el monosulfoaluminato de calcio, formando etringita en el concreto frío y endurecido (Sandoval, 2012).

Se han postulado varias teorías para explicar el mecanismo de retardo del C_3A por el yeso. Una de ellas menciona que el yeso y los álcalis entran rápidamente en solución, la solubilidad del C_3A se deprime en presencia de iones de hidróxido, de álcalis y de sulfatos. Dependiendo de la concentración de iones de aluminato y de sulfato en solución, el producto cristalino precipitado es hidrato trisulfato de aluminato de calcio, o hidrato monosulfato de aluminato de calcio (Martínez Reyes, 2007).

En soluciones saturadas con iones de calcio y de hidróxido, el primero se cristaliza como agujas cortas prismáticas y también es llamado alto sulfato o por el nombre mineralógico

etringita. El monosulfato también es conocido como bajo sulfato y se cristaliza como placa delgada hexagonales.

Aspectos químicos de la reacción puzolánica

La puzolana reacciona con CH y agua formando C-S-H de menor densidad que el producido por la hidratación del Cemento Portland. Los productos de la reacción puzolánica llenan los espacios inicialmente ocupados por agua reduciendo la porosidad, esto contribuye a la mejora de las propiedades de resistencia, al reducir la permeabilidad. El progreso de la reacción puzolánica es comúnmente evaluado en términos del consumo de CH en el sistema y puede expresarse de acuerdo a la reacción siguiente:



Los parámetros que afectan la reacción puzolánica son: contenido de fase amorfa y área superficial de la puzolana; la relación Cemento/puzolana en la mezcla, relación agua/sólido en la mezcla, la temperatura y el tiempo de curado. La heterogeneidad química y física de la familia de las puzolanas hace que los esquemas de reacción sean complejos, esto no permite establecer un modelo único de actividad puzolánica. En función de la composición química de la puzolana, se encontrarán diferencias en la composición de los productos de hidratación, lo cual repercute en propiedades como resistencia y estabilidad dimensional.

Caracterización de los Materiales

Las relaciones de estructura-propiedades-procesamiento se encuentran intrínsecamente relacionadas con los materiales que conformaran al concreto, modificándose por el medio ambiente al cual está sujeto el material. La estructura del material se puede considerar en diferentes niveles: estructura atómica, cristalina, granular, estructura multifásica.

Los materiales cerámicos se emplean por su naturaleza dura y quebradiza y el enlace en los mismos es de tipo iónico, covalente o con características mixtas iónicas y covalentes (Askeland & Phulé, 2004).

Los materiales cerámicos existen en estado amorfo o vítreo con frecuencia la microestructura es compleja presentando fases tanto cristalinas como vítreas.

Por tal motivo es necesario estudiar la relación compleja entre la estructura interna del material, su procesamiento y las propiedades mecánicas como físicas .

Podemos considerar las propiedades de un material en dos categorías: mecánicas y físicas. Las propiedades mecánicas describen la forma en que el material responde a una fuerza aplicada, incluyen resistencia, rigidez, ductilidad, fatiga, termofluencia y desgaste. Las propiedades físicas incluyen el comportamiento eléctrico, magnético, óptico, térmico, elástico y químico dependen tanto de la estructura como del procesamiento de un material.

La microestructura de un material es el número de fases que contiene además de la distribución de las fracciones de volumen, forma y tamaño, debido a que sus propiedades son sensibles a su estructura.

Análisis Físico-Químico

La estructura de un material puede ser examinada en cuatro niveles: estructura atómica, arreglo de los átomos, microestructura y macroestructura.

La estructura atómica influye en la forma en que los átomos se unen entre sí, permitiendo clasificarlos, como metales, semiconductores, cerámicos y polímeros.

El arreglo atómico juega un papel importante en la determinación de la microestructura y en el comportamiento de un material sólido (Askeland & Phulé, 2004)

La forma o estructura externa que exhiben los cristales, es debida en la escala microscópica a un orden más fundamental: los átomos o moléculas que constituyen la sustancia adoptan, en el estado sólido, una estructura regular y periódica.

Enlaces atómicos

Los átomos son las partículas fundamentales de las sustancias, cuando se combinan químicamente, con átomos del mismo elemento o con átomos diferentes, forman moléculas de compuestos químicos. La atracción que existe entre los átomos es un enlace químico debido a la interacción entre los átomos producto de la disminución de la energía potencial total del sistema y un aumento en la estabilidad. Se sabe que la manera en que los átomos se enlazan ejerce un efecto profundo sobre las propiedades físicas y químicas de las sustancias (Askeland & Phulé, 2004). Existen cuatro mecanismos importantes mediante los cuales los átomos se enlazan o unen formando sólidos: enlace metálico, enlace covalente, enlace de Van der Waals, enlaces mixtos.

Enlace metálico

Los elementos metálicos que tienen una electronegatividad baja ceden sus electrones de valencia para formar una nube de electrones que rodea a los átomos. Los electrones de valencia se mueven libremente dentro de la nube de electrones y se asocian con varios centros atómicos. Los centros atómicos cargados positivamente se mantienen unidos mediante la atracción mutua con los electrones, produciendo así un fuerte enlace metálico (Askeland & Phulé, 2004).

Enlace Covalente

Se trata de un enlace en el que dos átomos comparten electrones, ninguno de los átomos posee completamente el par de electrones. La energía que se requiere para eliminar todos los electrones de valencia es demasiado grande para que el enlace iónico sea posible, estos electrones pueden completar su capa externa compartiendo electrones con sus vecinos.

Enlace de Van der Waals

Los enlaces de Van der Waals unen moléculas o grupos de átomos mediante una atracción electrostática débil. Muchas moléculas están polarizadas de manera permanente; algunas porciones de la molécula están cargadas positivamente, en tanto que otras lo están negativamente. La atracción electrostática entre regiones de carga positiva de la molécula y regiones de carga negativa de una segunda molécula unen de manera débil ambas moléculas. Esto comúnmente llamado enlace de hidrógeno ocurre cuando una de las regiones polarizadas está formada de átomos de hidrógeno. El enlace Van der Waals es un enlace secundario, aunque los átomos dentro de la molécula o grupo de átomos siguen unidos mediante fuertes enlaces covalentes o iónicos. Estas interacciones ocurren cuando las moléculas están muy próximas. Todas las fuerzas de van der Waals son cohesivas y varían con respecto a la distancia como $1/r^6$. Las fuerzas de van der Waals son consideradas como la explicación molecular para las energías cohesivas de los líquidos y son semejantes en magnitud a las entalpías de vaporización de muchos líquidos, su valor aproximado es de $-41.84 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Enlaces mixtos

El enlace entre átomos es una mezcla de dos o más de los anteriores tipos. Los compuestos formados a partir de dos o más metales (compuestos inter metálico) pueden estar enlazados mediante una mezcla de enlaces metálicos e iónicos, particularmente cuando existe una diferencia importante en electronegatividad entre elementos. Muchos compuestos cerámicos y semiconductores son combinaciones de elementos metálicos y no metálicos, tendiendo una mezcla de enlaces covalentes e iónicos. Conforme aumenta la diferencia de electronegatividad entre los átomos, los enlaces se hacen más iónicos.

Material Cristalino

Un material cristalino es aquel en el que los átomos se estructuran en redes basadas en la repetición tridimensional de sus componentes. Las estructuras que se repiten se llaman célula o celda cristalina (Figura 1-19). Estas propiedades de simetría también se manifiestan en ocasiones en simetrías macroscópicas de los cristales, como formas geométricas o planos de fractura.

Existen tres elementos de simetría que son:

Eje de simetría: Es una línea imaginaria que pasa a través del cristal, alrededor de la cual, al realizar éste un giro completo, repite dos o más veces el mismo aspecto.

Plano de Simetría: Es un plano imaginario que divide el cristal en dos mitades simétricas especulares, como el reflejo en un espejo, dentro de celda, puede haber múltiples planos de simetría. Un ejemplo de un plano de simetría es el cristal cúbico de la sal de gema, en este mineral se cristalizan cubos de color blanco o transparente. Refleja los elementos de simetría que regulan la disposición interna, observándose las caras, las aristas y los vértices del poliedro

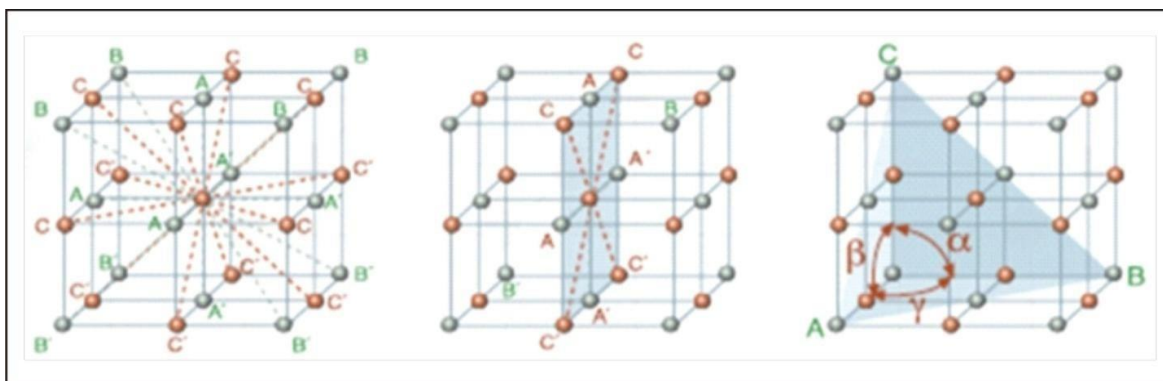


Figura 1-19 Representación del Cristal cúbico de la sal de gema

Centro de simetría: Es un punto dentro de la celda que, al unirlo con cualquiera de la superficie, al otro lado del centro y a la misma distancia, un punto similar.

La estructura cristalina es el concepto que describe la forma como se organizan los átomos en el material. La estructura cristalina se determina por Difracción de rayos X.

Estructura de los Materiales Cerámicos

Los materiales cerámicos son compuestos químicos o soluciones complejas, que contienen elementos metálicos y no metálicos. Teniendo una amplia gama de propiedades mecánicas y físicas. Debido a sus enlaces iónicos o covalentes, los materiales cerámicos por lo general son duros, frágiles, con un alto punto de fusión, tienen una baja conductividad eléctrica y térmica, buena estabilidad química y elevada resistencia a la compresión (Skoog, Holler, & Crouch, 2008).

Estructura del corindón

Una de las formas de la alúmina, Al_2O_3 tiene la estructura cristalina del corindón, similar a una estructura hexagonal compacta, a cada celda unitaria está asociados 12 iones de aluminio y 18 de oxígeno. La alúmina es un material común que se utiliza como refractario, aislante eléctrico y abrasivo. Además, el Fe_2O_3 tiene esta misma estructura (Askeland & Phulé, 2004).

Estructura de los silicatos cristalinos

Algunos materiales cerámicos contienen enlaces covalentes. La forma del SiO_2 , o sílice, que es una materia prima importante para los productos cerámicos. La disposición de los átomos en la celda unitaria proporciona la coordinación adecuada, equilibra la carga y, además, asegura que no se viole la direccionalidad de los enlaces covalente. En la sílice, el enlace covalente requiere que los átomos de los silicatos tengan cuatro vecinos cercanos (cuatro átomos de oxígeno), creando así una estructura tetraédrica. Los tetraedros de sílice-oxígeno son las unidades estructurales fundamentales de la sílice, de las arcillas y de silicatos vítreos (Askeland & Phulé, 2004).

Estructuras de la sílice

Cuando las cuatro esquinas de los tetraedros están compartidas con otros tetraedros iguales se produce la cristobalita, la forma típica del SiO_2 . Este compuesto puede existir en varias formas alotrópicas. Conforme se incrementa la temperatura, la sílice cambia de cuarzo α a cuarzo β a tridimita β y a líquido.

Luz y rayos X

Cuando un haz de luz incide sobre un medio puede ser transmitido (refractado), reflejado, difundido (sobre una superficie rugosa o por pequeñas partículas), absorbido o puede provocar la emisión de luz (normalmente en una frecuencia distinta). El color y el brillo son algunas de las sensaciones que resultan de estos fenómenos en el rango de frecuencias del espectro visible, pero existe instrumentación para estudiarlos en un amplio margen del espectro electromagnético (Van Grieken & Markowicz, 2002).

La refracción, la reflexión y la difusión pueden explicarse mediante el modelo ondulatorio de la luz y su geometría. Por su parte, la emisión y la absorción implican transferencia de energía entre la radiación electromagnética y el medio afectado, y precisan de una explicación algo más compleja.

En la Figura 1-20 se observa un haz de luz que incide sobre una superficie irregular sufre reflexión y refracción en cada punto, de tal manera que los rayos reflejados (azul) y transmitidos (naranja) siguen caminos irregulares. Es conocido como reflexión y transmisión difusa.

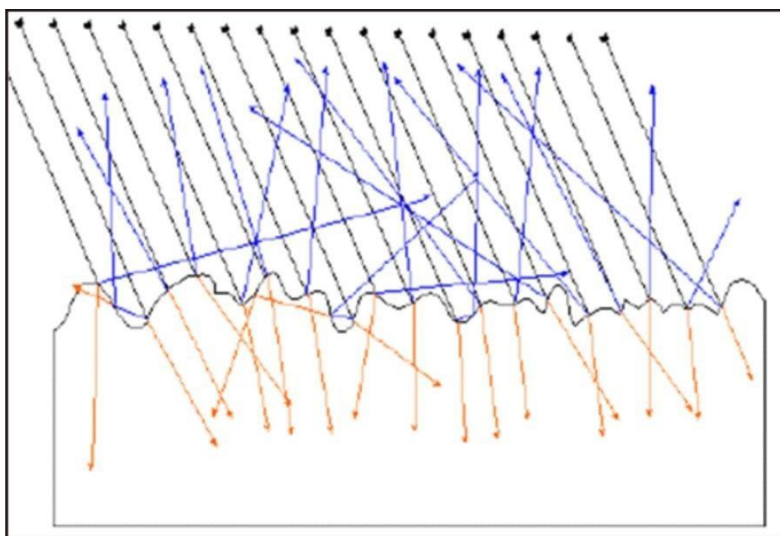


Figura 1-20 Luz incidiendo sobre una superficie.

En 1895 los rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Konrad Röntgen Rontgen, posteriormente, en 1912 Max Von Laue descubrió la Difracción de rayos X,

consecutivamente la aplicación inmediata para la determinación de las estructuras cristalinas fue realizada por W.L. Bragg (Van Grieken & Markowicz, 2002).

Los rayos X son producidos por el tubo de rayos X, el cual consiste en dos electrodos metálicos dentro de una cámara al vacío. Los electrones son producidos por el calentamiento del filamento (cátodo) de tungsteno.

El cátodo tiene un alto potencial negativo y los electrones son acelerados hacia el ánodo, el cual es normalmente una fuente potencial de tierra. Los electrones que van a una alta velocidad chocan con el ánodo el cual se enfría con agua y se producen los rayos X, estos a su vez pasan a través de una ventana de Berilio, la cual es transparente a los rayos X y se hacen incidir sobre la muestra. Un diagrama esquemático de un tubo de rayos X puede verse en la Figura 1-21.

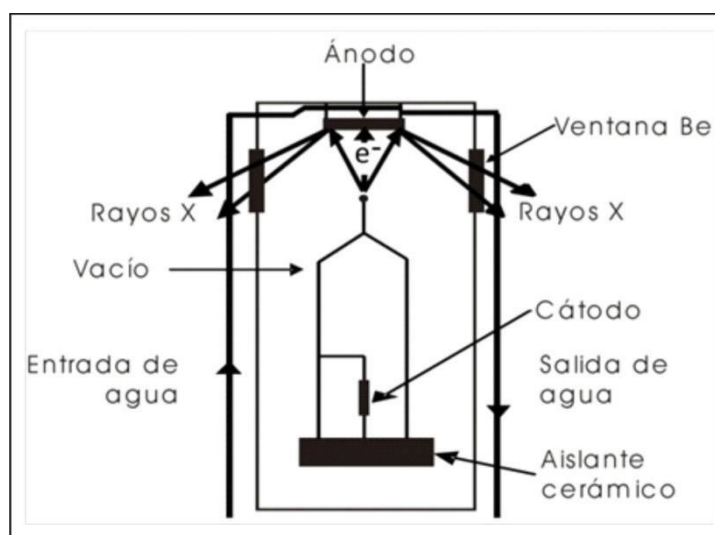


Figura 1-21 Diagrama del tubo de rayos X

Los métodos de Difracción de rayos X han constituido y constituyen la herramienta más poderosa de que se dispone para el estudio de la estructura íntima de la materia cristalina, dotando de una extensa base de resultados estructurales a la química, a la mineralogía y a la biología, donde el impacto que ha originado ha sido absolutamente revolucionario (Van Grieken & Markowicz, 2002).

Ley de Bragg

William Lawrence Bragg en 1913 expuso la Difracción de rayos X en sólidos manifestando que cuando los centros de dispersión forman una red periódica y el modo de excitación inicial de la superficie es una onda plana, las ondas que irradian de los obstáculos aparecen en direcciones bien definidas formando “rayos” que se propagan sólo en un número relativamente pequeño de direcciones (Cullity, 1956).

Esta ley permite estudiar las direcciones en las que la Difracción de rayos X sobre la superficie de un cristal produce interferencias constructivas, dado que permite predecir los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material con estructura atómica periódica (materiales cristalinos).

Estableciendo la relación entre distancia entre planos cristalinos (d), la longitud de onda (λ) y el ángulo de incidencia (θ) del haz de rayos X.

En la Figura 1-22 se representa la radiación que alcanzan a los rayos X. Los puntos en los que la radiación se superpone constructivamente es la zona de intersección de los anillos.

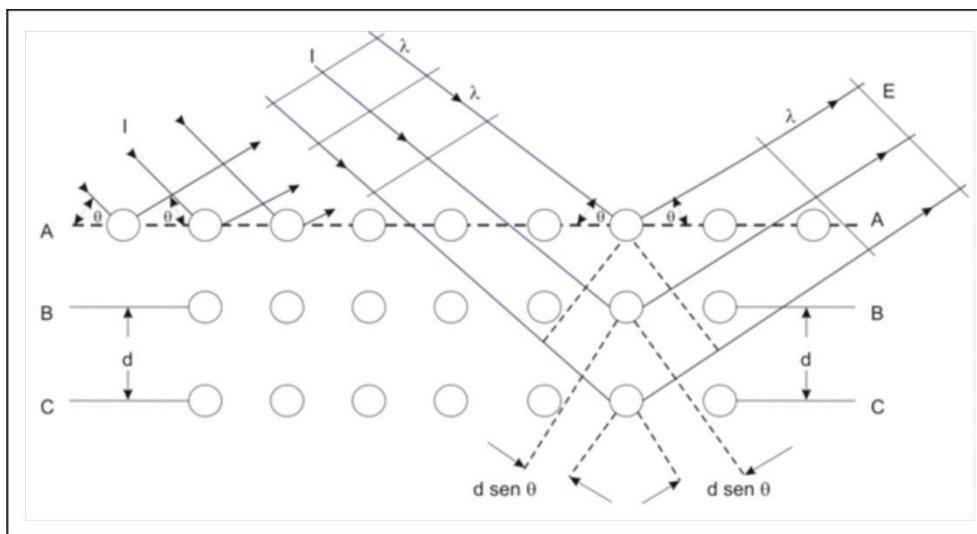


Figura 1-22 Esquematación de Rayos X incidiendo en un Cristal.

Bragg presentó un modelo simple en el que supone que las ondas incidentes de rayos X se reflejan en forma especular de planos (hkl) paralelos sucesivos de átomos en el cristal, donde cada plano refleja una pequeña fracción de la radiación, este fenómeno se observa en la Figura 1-23.

Los haces difractados solo se encuentran cuando la reflexión de los planos paralelos interfiere en forma constructiva, es decir con diferencias de fase $2\pi n$.

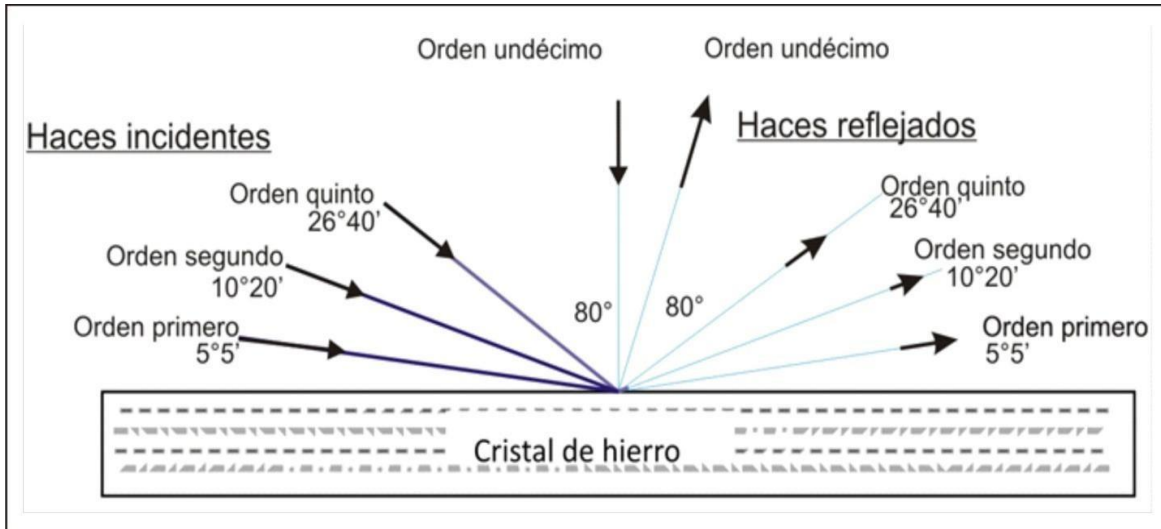


Figura 1-23 Haces Incidentes Reflejados en un Cristal de Hierro

Considerando planos paralelos con separación d , la diferencia de trayectoria para reflexiones sucesivas de planos adyacentes es $2d \sin \theta$, donde θ es el ángulo de incidencia medido a partir del plano. La interferencia constructiva se presenta cuando esta diferencia de trayectoria es igual a un número entero n de longitudes de onda λ :

$$n \lambda = 2 d \sin \theta$$

Esta ley es una consecuencia de la periodicidad de la red. La ley no da referencia respecto al arreglo de átomos en la base asociada con cada punto de la red. La reflexión de Bragg puede ocurrir únicamente para longitudes de onda $\lambda \leq 2d$, esta es la razón por la cual no es posible utilizar luz visible.

Técnicas de Caracterización

Las técnicas de caracterización han sido utilizadas para el estudio del proceso de hidratación del Cemento. Siendo las más utilizadas: Microscopio de electrón, Resonancia Magnética, Difracción de rayos X, Radiación Infrarroja (IR), Calorimetría, Análisis Térmico, Velocidad de Pulso Ultrasónico (Ramachandran, 2001).

Las técnicas de caracterización requieren que se asuma la composición química de la mezcla siendo el grado de hidratación derivado indirectamente (Mouret, 2001).

Los principales productos de hidratación en los Cementos compuestos son similares a los encontrados en Cemento puro pero la adición constituye muchas veces en afectaciones en la hidratación o estequiométricamente en los productos de hidratación (Voglís, 2005 cita a Sarkar (1993), Taylor (1997)).

El conocimiento de la estructura cristalina de los materiales permite con base a la relación estructura-composición-propiedad determinar las técnicas apropiadas para evaluarlos, en la Figura 1-24 se presentan las técnicas de caracterización y la aplicación que tienen.



Figura 1-24 Técnicas de caracterización.

Con base en el arreglo atómico, la materia puede ser clasificada en dos grupos. Primeramente, las que presentan un orden atómico a muy corto alcance, esto es, materiales amorfos, y los materiales que poseen un orden a largo alcance, materiales cristalinos (Figura 1-25).



Figura 1-25 Clasificación de la cristalinidad

Las pruebas para la evaluación de la actividad puzolánica se dividen en dos grupos: métodos directos, que miden el consumo de CH por la reacción puzolánica (trituración química, Difracción de rayos X (DRX) y Análisis Termo Gravimétrico ATG); y métodos indirectos, que miden un cambio en una propiedad relacionada con la reacción puzolánica (Índice de Actividad Hidráulica, Conductividad Eléctrica)(Pourkhorshidi, 2013; Tironi et al., 2013).

Fluorescencia de rayos X

La técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX) consiste en el análisis químico de una muestra por una fuente que excita los electrones de los elementos que constituyen la muestra de tal manera que algunos de ellos abandonan sus niveles orbitales originales, otros electrones ocuparán los lugares dejados por aquellos, emitiéndose un fotón con una energía característica para cada elemento. La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición electrónica. Entonces, los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones: la llamada radiación X fluorescente o secundaria. Esta radiación de Fluorescencia es característica para cada elemento químico. Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda).

La finalidad principal del RF consiste en el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y uranio (U). Los elementos mayoritarios que se determinan son: Al_2O_3 , P_2O_5 , K_2O , CaO , SiO_2 , TiO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O y como elementos traza: V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ba, Nb, Rb, Sr, Y, Zr, U, Th, Pb, S. Logrando alcanzar unos límites de detección de hasta 0.002% (20 Págm).

Análisis Termo Gravimétrico

La actividad puzolánica, la capacidad de fijar la cal, de las puzolanas puede ser medida por Análisis Termo Gravimétrico. Este método se basa en la descomposición térmica del hidróxido de calcio cristalizado en un rango de temperatura entre 400-500 °C a óxido de calcio y agua. Por la aplicación de las temperaturas antes mencionadas, el hidróxido de calcio se descompone y el agua resultante es evaporada. La reducción de peso resultante de la evaporación del agua en esta prueba es muy baja para puzolanas adecuadas y alto para puzolanas pobres (Pourkhorshidi, 2013). Cuando se utiliza este método existen varias precauciones que se deben tomar. Por ejemplo la temperatura de descomposición de la portlandita varía dependiendo en diversos factores, incluyendo los alkalis en el sistema y el tamaño del grano, así es importante determinar la temperatura apropiada para cada muestra en particular, examinando la primera derivada de la curva del Análisis Termo Gravimétrico o la segunda derivada de la curva del Análisis Diferencial Termo Gravimétrico (Maria C G Juenger & Siddique, 2015).

Análisis Mineralógico

Los componentes minerales de las puzolanas son identificados semi-cuantitativamente por el método de la Difracción de rayos X. La cantidad de silica amorfa la cual tiene una mayor participación en la actividad puzolánica es determinada a través de la identificación de la cantidad de minerales cristalinos. Debe notarse que existe una relación entre el residuo insoluble y la Difracción de rayos X; como el contenido de residuo insoluble indica la cantidad de los minerales solubles e insolubles detectados en la Difracción de rayos X. Respecto a la evaluación de los principales óxidos, evaluar los minerales amorfos y cristalinos para las puzolanas naturales es de principal importancia. El resultado de numerosos estudios anteriores revelaron que los componentes amorfos (como la cristobalita, zeolita y la calcita) son las más importantes fases alcalinas activas. No hay un consenso universal sobre un límite determinístico en la cantidad de minerales amorfos en las puzolanas naturales utilizadas para la sustitución del Cemento (Pourkhorshidi, 2013).

Con diferentes variaciones en las proporciones de las mezclas, el método indirecto estandarizado más utilizado es el Índice de resistencia. Mide la contribución de la actividad puzolánica en la densificación de la matriz cementicia, pero también incluye el efecto de relleno que mejora la resistencia a la compresión. Los resultados de este tipo de pruebas dependen de la relación agua/Cemento para la misma consistencia y de la proporción y del tipo (por volumen o por peso) del reemplazo del Cemento por el material cementante suplementario que modifica el contenido de agua en el mortero (Tironi et al., 2013).

ASTM C618

El más común y simple de los métodos para evaluar la actividad puzolánica es el de la ASTM C618. ASTM C618 presenta los requisitos químicos y físicos y las especificaciones de las cenizas volantes y las puzolanas naturales para la sustitución del Cemento. La ASTM C618 fue publicada en 1968 para combinar y reemplazar la ASTM C350 de las cenizas volantes y la ASTM C402 de otras puzolanas. Brevemente, en este método, los criterios más importantes para la actividad puzolánica son: (1) la suma de sus componentes químicos que son, $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ y (2) el Índice de resistencia definido por la ASTM C311. (Parhizkar, Najimi, & Pourkhorshidi, 2010).

La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi) en unidades corrientes utilizadas en EEUU o en mega pascales (MPa) en unidades SI.

Justificación

Dentro de los sectores más grandes de la economía mundial y nacional se encuentra la industria de la construcción que mayormente depende de la industria del Cemento, la cual, como se ha planteado anteriormente, es causante de grandes problemas ambientales, principalmente por sus aportaciones a las emisiones de gases de efecto invernadero. Nuestro país, caracterizado por encontrarse en vías de desarrollo, con una economía creciente, incrementa constantemente su consumo de Cemento.

Debido a lo anterior nuestro país contribuirá a las emisiones en mayor medida, por lo que es necesario mitigar la aportación de la industria a las emisiones de CO₂ y el presente proyecto busca aportar conocimiento científico para posibles sustituciones parciales de Cemento portland, mediante la utilización de la gallinaza producida en el estado de Quintana Roo.

La industria avícola presenta un desarrollo muy grande en últimas décadas debido al incremento de la población mundial y la creciente demanda de alimentos ricos en proteínas, aunado a lo anterior, la avicultura se desarrolla en diferentes niveles de intensidad alto, medio y bajo, en todos estos niveles se presentan problemas muy grandes en cuanto al manejo de los residuos, principalmente de las excretas, ya que son altamente contaminantes, producen malos olores, son vectores para diversos virus y no se tiene destinado a ningún uso posterior.

Estas aportaciones científicas crearán un sustento para una industria nueva y con miras a incrementar las posibilidades de desarrollo económico de la región, reutilizando un producto de alto impacto negativo al medio ambiente dentro de una de las industrias más contaminantes a nivel mundial.

Hipótesis o Premisas

- ❖ La ceniza de gallinaza presentará alta actividad puzolánica, sustituirá al menos un 10% al Cemento y presentará mejores propiedades físicas y mecánicas que un Cemento portland compuesto.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el desempeño mecánico y físico-químico de una pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza como sustituto parcial de Cemento portland.

Objetivos Particulares

- Obtener material puzolánico a partir de la gallinaza mediante calcinación a tres diferentes temperaturas determinadas mediante ATG.
- Evaluar el Índice de actividad Hidráulica del material mediante la norma NMX-C-273-ONNCCE.
- Evaluar la composición química y características cristalográficas del material mediante DRX y FRX.
- Evaluar mecánicamente tres porcentajes de sustitución de Cemento portland, mediante resistencia a la compresión.

Metas

- Calcinar la gallinaza a tres temperaturas diferentes.
- Determinar comportamiento térmico de la gallinaza.
- Determinar la composición química de la ceniza de gallinaza.
- Determinar las características cristalográficas de la ceniza de gallinaza.
- Determinar la resistencia a la compresión de morteros adicionados con ceniza de gallinaza.

Capítulo 2. Diseño de la Investigación

Metodología

La metodología se encuentra dividida en dos etapas, la primera para determinar datos iniciales e identificar las características físicas y químicas del material a evaluar como sustituto parcial de Cemento portland (la gallinaza y la ceniza de gallinaza), una segunda etapa que determina las características mecánicas del material, ya como una sustitución del Cemento portland en diferentes porcentajes de sustitución.

Etapas 1: Caracterización de los materiales y determinación de la temperatura de calcinación.

La finalidad de esta fase es concluir que temperatura de calcinación de la gallinaza produce la ceniza con mejor desarrollo de resistencia en los morteros, es en un sentido general encontrar la temperatura de tratamiento, con sustento en el Análisis Termo Gravimétrico de la muestra y en las pruebas de resistencia a la compresión, al que se obtiene un mejor desarrollo de la resistencia y así continuar a la segunda fase buscando porcentajes de sustitución mayores al 10%.

Como se muestra en los siguientes puntos el desarrollo de la metodología planteada es lineal, ya que cada paso depende de los resultados de la actividad anterior y es así como avanzamos hasta obtener los resultados y partiendo de ellos se evalúa y se inicia el siguiente procedimiento completando los objetivos particulares trazados para esta investigación.

Obtener material puzolánico a partir de la gallinaza mediante calcinación a tres diferentes temperaturas determinadas mediante ATG.

Para realizar el análisis mediante FRX se utilizará un tamaño de partícula menor a la malla No. 200, este se llevará a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Coahuila. En el equipo mostrado en la Figura 2-1.



Figura 2-1 Difractómetro. Fuente: Propia

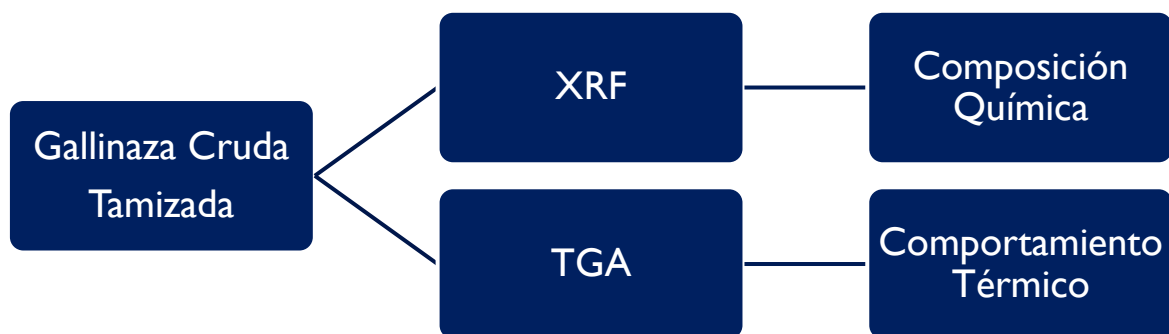


Figura 2-2 Pruebas a realizar sobre la gallinaza cruda. Fuente: Propia

Siguiendo el mismo criterio de caracterizar el material, se realizará el análisis Termo Gravimétrico para obtener el comportamiento térmico y así determinar las tres temperaturas a las que será probado el material como sustituto parcial de Cemento portland (Figura 2-2).

Para realizar el Análisis Termo Gravimétrico (ATG), la gallinaza se cribará utilizando la malla No. 10, para eliminar la gravilla presente en el material original.

Se tomará una muestra para realizar el ATG en un equipo Perkin Elmer ATG 4000 (Figura 2-3).



Figura 2-3 Equipo Perkin Elmer ATG 4000. Fuente: www.perkinelmer.com

Los resultados mostrados por el equipo serán analizados para determinar las temperaturas en que se logra la estabilidad térmica del material y así reconocer los cambios que presente el material en cuanto a su peso y posibles cambios físicos y químicos que puedan alterar el comportamiento de este.

Evaluar el Índice de actividad Hidráulica del material mediante la norma NMX-C-273-ONNCCE.

Para conocer el desempeño mecánico que producen las tres cenizas de gallinaza, que se producirán a las tres temperaturas diferentes que se determinaran con el paso anterior, como sustituto parcial de Cemento portland dentro de una pasta cementante.

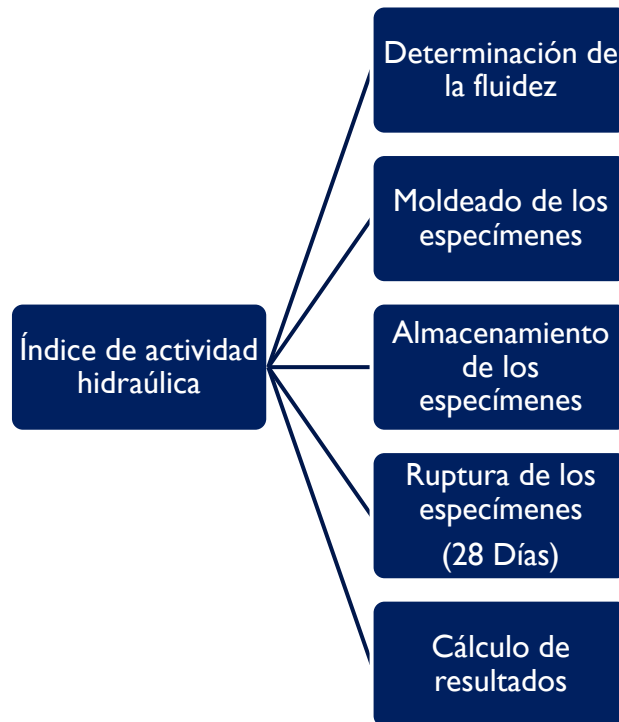


Figura 2-4 Esquema de obtención del IAH. Fuente: Propia

Se siguió las recomendaciones de la NMX-C-273-ONNCCE (Figura 2-4) para obtener resultados homologados metodológicamente y evitar variaciones que invaliden los resultados a obtener el cual es descrito a detalle a continuación:

Materiales

Cemento portland compuesto (CPC 30R) que cumpla con las especificaciones de la NMX-414-ONNCCE

Arena graduada que cumpla con los parámetros indicados por la NMX-C-061-ONNCCE.

3 cenizas de gallinaza a diferente temperatura, mediante un tratamiento térmico de dos horas dentro de un horno refractario – mufla a las temperaturas indicadas por ATG.

Proporcionamiento

Preparar seis especímenes con el Cemento CPC 30R, siguiendo el método indicado en la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE usando las proporciones indicadas en las Tablas 2-1 y 2-2:

Tabla 2-1 Proporciones para mortero testigo

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	500 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	Ensayos propuestos (Ver Anexo A)

Tabla 2-2 Proporciones para mortero de ensayo

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	Depende del porcentaje de sustitución
<i>Puzolana por ensayar</i>	Depende del porcentaje de sustitución
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	Igual a la utilizada para el testigo

Equipo necesario según NMX-C-061-ONNCCE: Balanza, Cuchara Plana, Máquina de ensayo, Mesa de fluidez, Mezclador mecánico, Moldes, Pesas, Pisón, Probetas, Mallas, Olla y paleta de mezclado.

Procedimiento

Las piezas que forman las caras interiores y la base de los moldes deben cubrirse con una capa ligera de aceite mineral o de grasa delgada asegurando que el contacto entre ellos sea hermético. Después de armar los moldes, se quita el exceso de aceite o de grasa del interior de las caras, así como de la superficie superior del molde.

Determinación de la fluidez

La parte superior del platillo de la mesa debe limpiarse, secarse cuidadosamente y colocar el molde al centro.

Se pone en el molde una primera capa de mortero aproximadamente de 25 mm de espesor que se compacta 20 veces con el pisón. La presión para compactar debe ser la necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde.

Llenar el molde totalmente y se compacta nuevamente como se especificó para la primera capa.

Enrasar la superficie del mortero pasando el filo de una cuchara de albañil (que se sostiene casi perpendicular al molde) con un movimiento de aserrado sobre el borde superior del molde.

Limpiar y secar cuidadosamente la parte del platillo de la mesa de fluidez no cubierta por el molde teniendo especial cuidado de hacerlo en la intersección de la base inferior del molde con la mesa de fluidez.

Al transcurrir un minuto a partir del momento de haber terminado el mezclado se levanta el molde; el platillo se deja caer 25 veces en 15 s de una altura de 12,7 mm. La fluidez es el incremento del diámetro de la base de la masa del mortero expresado como porcentaje del diámetro de la base original. El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de por lo menos 4 mediciones de diámetro de 45° aproximadamente. Se deben hacer mezclas de ensayo variando los porcentajes de agua hasta obtener la fluidez especificada. Cada ensayo se debe hacer con un nuevo mortero.

Para Cemento portland en el que no se hace el ensayo de fluidez, se deja que el mortero permanezca dentro de la olla de mezclado durante 90 s sin cubrir y se debe bajar el material

adherido a los lados de la olla durante los últimos 15 s de este periodo, luego se vuelve a mezclar durante 15 s a velocidad media, antes de moldear los especímenes. Al terminar el mezclado el mortero adherido a la paleta de mezclado se deposita dentro de la olla de mezclado.

Moldeado de los especímenes

Inmediatamente después de terminar el ensayo de fluidez, el mortero que se empleó en la misma se regresa al recipiente de mezclado mediante la cuchara de albañil, rápidamente todo el mortero adherido a las paredes del recipiente citado se incorpora al resto del mortero. Se continúa el mezclado por 15 s a la velocidad media (285 rev por min). El mortero adherido a la paleta de mezclado se incorpora al mortero del recipiente. La preparación de los especímenes se debe empezar dentro de un tiempo no mayor de 2 min 30 s a partir de haber terminado el mezclado inicial del mortero. Se coloca en los compartimientos del molde de los especímenes una capa de mortero de 25 mm de espesor aproximadamente y luego el mortero de cada compartimiento se compacta con el pisón, 32 veces en 10 s, en 4 vueltas. La iniciación de cada vuelta se efectúa a 90° con respecto a la siguiente (o a la anterior) y consiste en 8 golpes adyacentes repartidos sobre la superficie. La presión para compactar el espécimen debe ser la necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde.

Las cuatro vueltas (32 golpes) se deben completar en un espécimen antes de empezar con el siguiente. Una vez terminado el apisonado de la primera capa en todos los especímenes, los compartimientos se deben llenar utilizando el resto del mortero y se vuelven a compactar tal como se hizo en la primera capa.

Durante el compactado de la segunda capa, todo el mortero que sobresalga del molde después de cada vuelta se regresa al compartimiento con la mano cubierta con guantes de hule antes de iniciar la siguiente vuelta de apisonado.

Luego de terminar la compactación, el mortero sobresaliente se extiende suavemente con la cuchara de albañil. A continuación, con la cuchara de albañil se aplana el mortero regresando a los compartimientos el material que se encuentra en los bordes del molde, con la cuchara de albañil ligeramente inclinada, una sola vez a ángulos rectos sobre cada espécimen y en dirección normal al eje longitudinal del molde.

Luego nivelar el mortero de los moldes para que tengan un espesor uniforme, se enrasa la superficie al borde superior del molde usando la cuchara de albañil en posición ligeramente inclinada por una sola vez y después se elimina el exceso de mortero haciendo un corte con la orilla de la cuchara de albañil imprimiéndole un movimiento de corte de sierra en el sentido longitudinal del molde.

Cuando sea necesario elaborar de inmediato mayor número de especímenes, se prepara el mortero igual al hecho anteriormente, pero eliminando el ensayo de fluidez, (para aquellos en que se deba hacer esta determinación) y se deja en reposo dentro de la olla durante 90 s; después se mezcla durante 15 s a la velocidad media (285 rev por min) antes de moldear los especímenes.

Almacenamiento de los especímenes

Inmediatamente después de elaborar los especímenes con su molde y sobre su placa se colocan en la cámara o gabinete húmedos dejando sus superficies expuestas al ambiente, pero protegidas del goteo directo. Los especímenes deben permanecer dentro de los moldes durante 20 h a 24 h; en caso de que se retiren de los moldes antes de las 24 h deben conservarse en la cámara o gabinete húmedos hasta que se cumpla esta edad. Al cumplir esta edad los especímenes se sumergen en agua saturada de cal en los tanques de almacenamiento, contruidos de material no corrosivo. El agua de los tanques se debe mantener limpia, renovándola frecuentemente y conservando la saturación de cal.

Ruptura de los especímenes

Al cumplir la edad de ensayo, los especímenes se retiran de la cámara o gabinete húmedos o bien de los tanques de almacenamiento y se ensayan de inmediato, con las tolerancias de tiempo que se especifican en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Tolerancia del tiempo de ensayo a la compresión.

Edad de Tolerancia ensayo

24 h	±30 min
------	---------

<i>3 d</i>	$\pm 1 \text{ h}$
<i>7 d</i>	$\pm 3 \text{ h}$
<i>28 d</i>	$\pm 12 \text{ h}$

Las tolerancias se toman en cuenta a partir del momento en que se retiran los especímenes de la cámara o gabinete húmedos para los ensayos de 24 h y del agua de curado para los ensayos a las demás edades.

Si se extrae de la cámara húmeda más de un espécimen a la vez para el ensayo de 24 h, dichos especímenes se deben cubrir con una tela húmeda hasta el momento del ensayo.

Si más de un espécimen se saca del tanque de almacenamiento para ensayarse a otras edades, dichos especímenes se deben colocar hasta el momento del ensayo en un recipiente con agua que los cubra por completo y cuya temperatura sea de $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para obtener resultados confiables en los ensayos es necesario que las caras de los especímenes que se usen sean superficies planas. Es importante conservar los moldes escrupulosamente limpios para evitar irregularidades.

Los implementos que se usen para la limpieza de los moldes deben ser de material más suave que éstos, a fin de no causarles desgaste.

Cada espécimen se debe secar superficialmente, quitar los granos sueltos de arena y las incrustaciones de aquellas caras que hagan contacto con las placas de la máquina. Se debe comprobar que dichas caras sean planas mediante el uso de una regla.

La carga se debe aplicar sobre las caras de los especímenes que estuvieron en contacto con las paredes verticales del molde, el espécimen se coloca en la máquina centrándolo cuidadosamente con respecto a la placa superior. No se deben usar materiales elásticos o de cabeceo, antes del ensayo de cada espécimen se debe verificar que la placa con asiento esférico esté en condiciones de moverse libremente, se debe aplicar la carga inicial a cualquier velocidad conveniente hasta el 50 % de la carga máxima esperada, siempre que

ésta no sea mayor de 13,3 kN (1,400 kgf). No se debe aplicar carga inicial a los especímenes cuando se esperen cargas máximas menores de 13,3 kN (1,400 kgf). Se ajusta la velocidad de aplicación de la carga de manera que el remanente (o la carga total en caso de ser inferior a 13,3 kN (1,400 kgf) se aplique ininterrumpidamente hasta la ruptura del espécimen a una velocidad tal que la carga máxima se alcance en no menos de 20 s y no más de 80 s.

No se deben hacer ajustes a los controles de la máquina cuando un espécimen ceda con rapidez antes de la ruptura.

Cálculos y expresión de los resultados

Área de aplicación de la carga

Al calcular la resistencia a compresión, generalmente puede considerarse el área de la sección transversal del espécimen como de 25 cm², sin embargo, en los casos en que el área del espécimen varíe en más de 0,3 cm con relación al área de 25 cm² se debe usar el área real.

La resistencia a la compresión de todos los especímenes hechos de la misma muestra y ensayados a la misma edad se obtiene promediando los resultados e informando con una aproximación al 0,1 de N/mm²

Carga máxima

Registrar la carga máxima indicada por la máquina y se calcula la resistencia a la compresión, en N (o en kgf), dividiendo dicha carga entre el área de la sección transversal del espécimen, utilizando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{C_{m\acute{a}x}}{A}$$

Donde:

C es la carga máxima en N (kgf).

R es la resistencia a la compresión.

A es el área de la sección transversal del espécimen.

Calcular el Índice de actividad del Cemento en porcentaje, como sigue:

$$\text{Índice de actividad del Cemento} = (A/B) \times 100$$

Donde:

A es el promedio de la resistencia a la compresión de los cubos con el mortero del ensayo, a 7 días o a 28 días en MPa.

B es el promedio de la resistencia a la compresión de los cubos con el mortero testigo a 7 días o a 28 días en MPa.

Evaluar la composición química y características cristalográficas del material mediante DRX, FRX.

Las cenizas serán caracterizadas mediante Difracción de rayos X y Fluorescencia de rayos X (Figura 2-5) para conocer los cambios que se producirán con el tratamiento térmico a las tres temperaturas diferentes y así determinar que elementos y características pertenecientes a cada una de las cenizas son aceptables dentro de la matriz de los morteros a elaborar y probar mecánicamente.

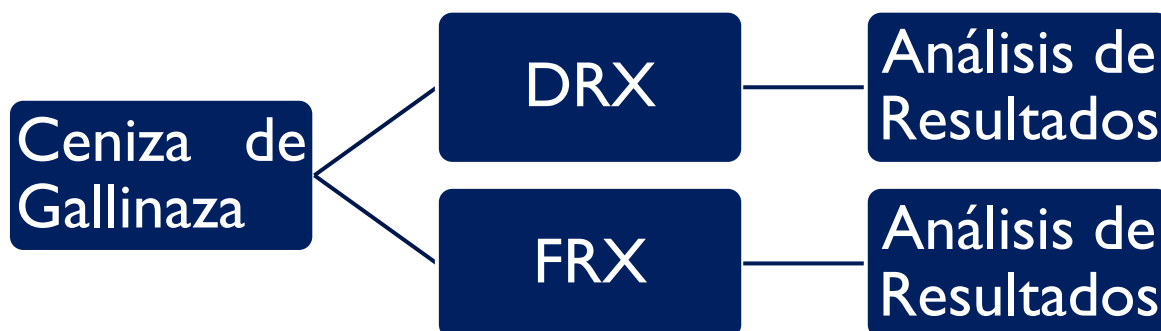


Figura 2-5 Procedimiento de análisis para la gallinaza

Etapa 2: Determinación del porcentaje de sustitución con mayor desarrollo de la resistencia a la compresión de la pasta cementante.

Durante la segunda etapa se determinará la resistencia a la compresión alcanzada por cada uno de los porcentajes de sustitución determinados por la etapa 1 a tres diferentes edades de curado ya que una de las características de las puzolanas es su lenta reacción y aportación al desarrollo de la resistencia a la compresión y se proponen 7, 28 y 90 días de curado.

Evaluar mecánica tres porcentajes de sustitución de Cemento portland, mediante resistencia a la compresión

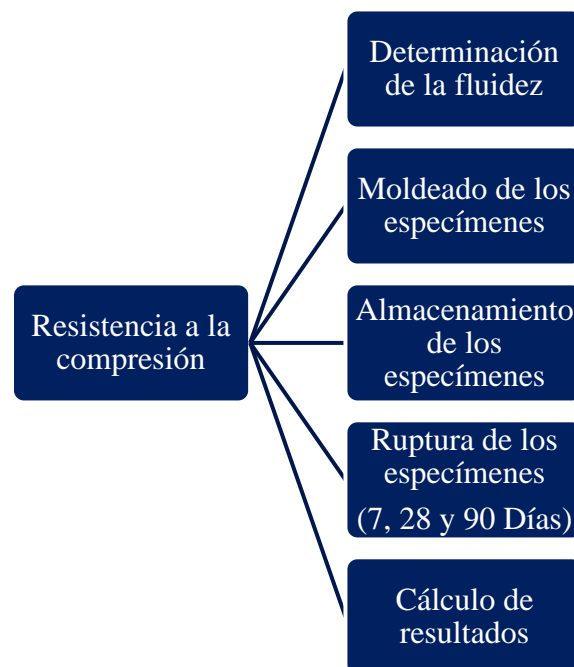


Figura 2-6 Procedimiento de la evaluación mecánica.

Diseño Experimental

Tabla de Muestras

Obtener material puzolánico a partir de la gallinaza mediante calcinación a tres diferentes temperaturas determinadas en el ATG.

Para las pruebas iniciales del material se proponen realizar las muestras que indica la Tabla 2-4, la gallinaza cruda y tamizada se someterá una vez a Análisis Termo Gravimétrico y a Difracción de rayos X para iniciar la evaluación del material.

Tabla 2-4 Muestras para obtener material puzolánico a partir de la gallinaza.

<i>Prueba</i>	Tratamientos	Repeticiones	Total de muestras
<i>DRX</i>	1(Cruda y Tamizada)	1	1
<i>ATG</i>	1(Cruda y Tamizada)	1	1

Evaluar el Índice de actividad Hidráulica del material mediante la norma NMX-C-273-ONNCCE.

La gallinaza será tratada 4 veces, los testigos, la temperatura 1, la temperatura 2 y la temperatura 3 de calcinación que resulten del Análisis Termo Gravimétrico, se pondrá a curado durante 28 días únicamente y se repetirá 6 veces como recomendación de la NMX-C-273-ONNCCE.

Tabla 2-5 Muestras para evaluar el Índice de actividad Hidráulica a 28 días

<i>Prueba</i>	Tratamientos	Repeticiones	Total de muestras
<i>Índice de Actividad Hidráulica</i>	4(temperatura)*1(edad)	6(NMX)	24

Evaluar la composición química y características cristalográficas del material mediante DRX y FRX.

Las cenizas tratadas a la temperatura 1, temperatura 2 y temperatura 3 se someterán a pruebas de Difracción de rayos y Fluorescencia de rayos x 1 vez cada una.

Tabla 2-6 Muestras para evaluar la composición química y cristalográfica de la ceniza

Prueba	Tratamientos	Repeticiones	Total de muestras
<i>DRX</i>	3(temperatura)	1	3
<i>FRX</i>	3(temperatura)	1	3

Evaluar mecánica tres porcentajes de sustitución de Cemento portland, mediante resistencia a la compresión.

Los 4 porcentajes de sustitución (muestra testigo, porcentaje de sustitución 1, porcentaje de sustitución 2, porcentaje de sustitución 3) determinados por la etapa 1 de la investigación serán evaluados mecánicamente a tres edades de curado (7, 28 y 90 días) dando un total de 72 muestras a elaborar para la prueba de resistencia a la compresión.

Tabla 2-7 Muestras para evaluar mecánicamente las sustituciones de Cemento portland.

Prueba	Tratamientos	Repeticiones	Total de muestras
<i>Resistencia a la compresión</i>	4(sustitución)*3(edad)	6(NMX)	72

Capítulo 3. Trabajo de Laboratorio

Se realizó la estancia de investigación bajo la supervisión de la Doctora Elia Martha Múzquiz Ramos perteneciente al Cuerpo Académico de Materiales Cerámicos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila para realizar:

1. Análisis Termo Gravimétrico (ATG) de la Gallinaza.
2. Análisis de las Fases Cristalinas de la Gallinaza mediante Difracción de Rayos X (DRX).
3. Análisis de la Composición Química de la Gallinaza mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).
4. Análisis de las Fases Cristalinas de las Cenizas de Gallinaza mediante Difracción de Rayos X (DRX).
5. Análisis de la Composición Química de las Cenizas de Gallinaza mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Se efectuó la calcinación de la gallinaza en los laboratorios de la Universidad Autónoma de Quintana Roo bajo la supervisión del Maestro José Luis Gonzales Bucio Catedrático de la Universidad para realizar:

1. Tratamiento Térmico de la Gallinaza a 800°C.

Las probetas del ensaye de los morteros para resistencia a la compresión y fluidez fueron elaboradas y probadas en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Chetumal bajo la dirección del Doctor Julio Cesar Cruz Argüello, para realizar:

1. Análisis de los datos.
2. Determinación de la resistencia de las sustituciones.

Se llevo a cabo la compra de gallinaza a un ganadero del poblado de Calderitas, que la utiliza como alimento para sus animales, esta gallinaza se encontró almacenada en una choza, resguardada de la lluvia, de la humedad del suelo, proviene de Yucatán.

Etapa 1: Caracterización de los materiales y determinación de la temperatura de calcinación.

Obtener material puzolánico a partir de la gallinaza mediante calcinación a tres diferentes temperaturas determinadas mediante ATG.

La gallinaza se cribó utilizando la malla No. 10, para eliminar la gravilla presente en el material original.



Figura 3-1 Gravilla retenida en la malla No. 10. Fuente Propia



Figura 3-2 Gallinaza cribada por la malla No. 10. Fuente: propia.

Se tomo una muestra para realizar el ATG en un equipo Perkin Elmer ATG 4000.

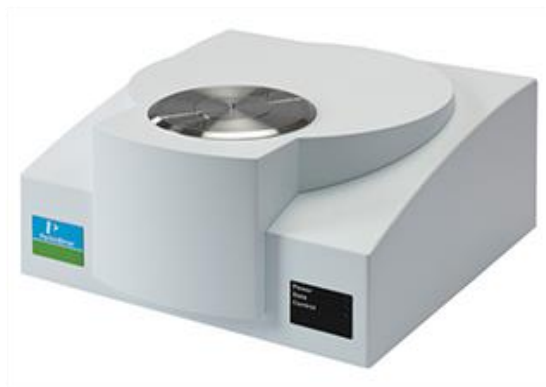


Figura 3-3 Equipo Perkin Elmer ATG 4000. Fuente: www.perkinelmer.com

Los resultados mostrados por el equipo serán analizados para determinar las temperaturas en que se logra la estabilidad térmica del material y así reconocer los cambios que presente el material en cuanto a su peso y posibles cambios físicos y químicos que puedan alterar el comportamiento de este.

Evaluar la composición química y características cristalográficas del material mediante DRX, FRX.

Para realizar el análisis mediante DRX es necesario disminuir el tamaño de las partículas de cada una de las muestras, hasta obtener un polvo fino en el mortero como se muestra en las Figuras 3-4, 3-5.



Figura 3-4 Muestra de ceniza antes del molido en mortero. Fuente: Propia.



Figura 3-5 Muestra de ceniza después del molido en mortero. Fuente: Propia

Para el análisis mediante DRX se prepararon los porta muestras (Figura 3-6) y se colocaron en el equipo de Difracción (Figura 3-7), haciéndose la lectura de 5° a 70° en 2θ .

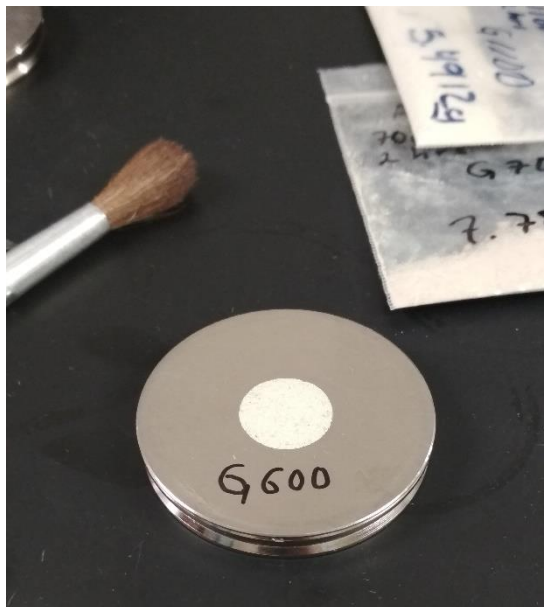


Figura 3-6 Porta muestras listo para introducirse al difractómetro. Fuente: Propia



Figura 3-7 Difractómetro. Fuente: Propia

Se obtienen los difracto gramas a analizar y determinar la composición cristalográfica.

Para el análisis mediante FRX se utilizaron las muestras pulverizadas en el mortero como se mostró en las Figuras 3-4 y 3-5. Se colocaron en la porta muestra (Figuras 3-8, 3-9, 3-10, 3-11, 3-12) y se colocó dentro del equipo para realizar las mediciones (Figura 3-13).

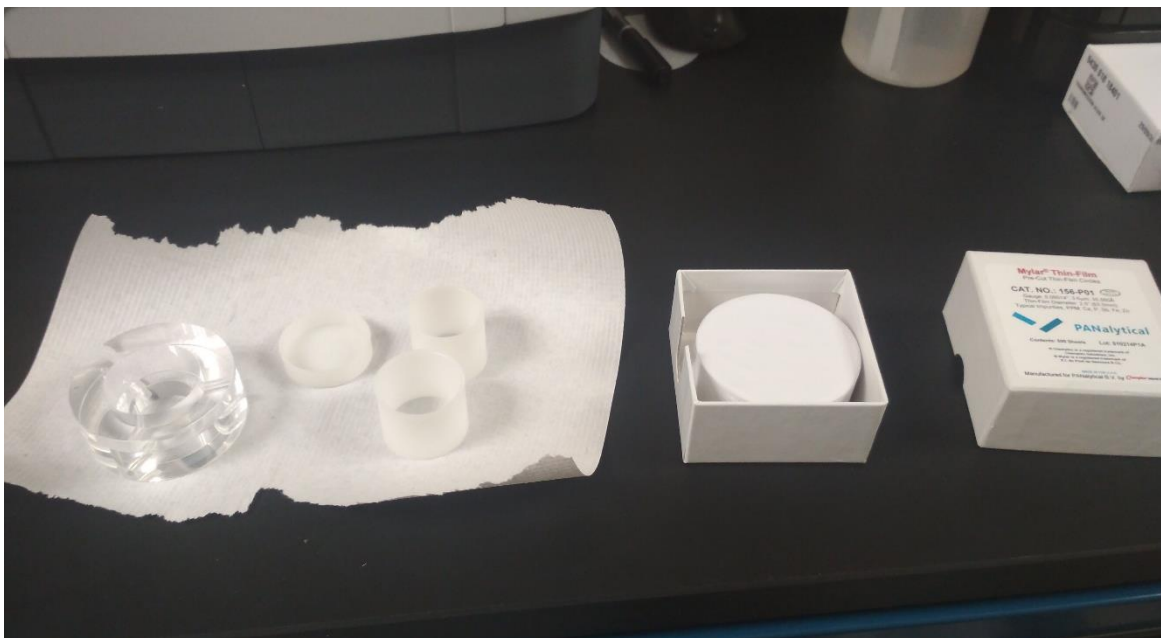


Figura 3-8 Porta muestras limpios y material necesario para colocar las muestras. Fuente: Propia

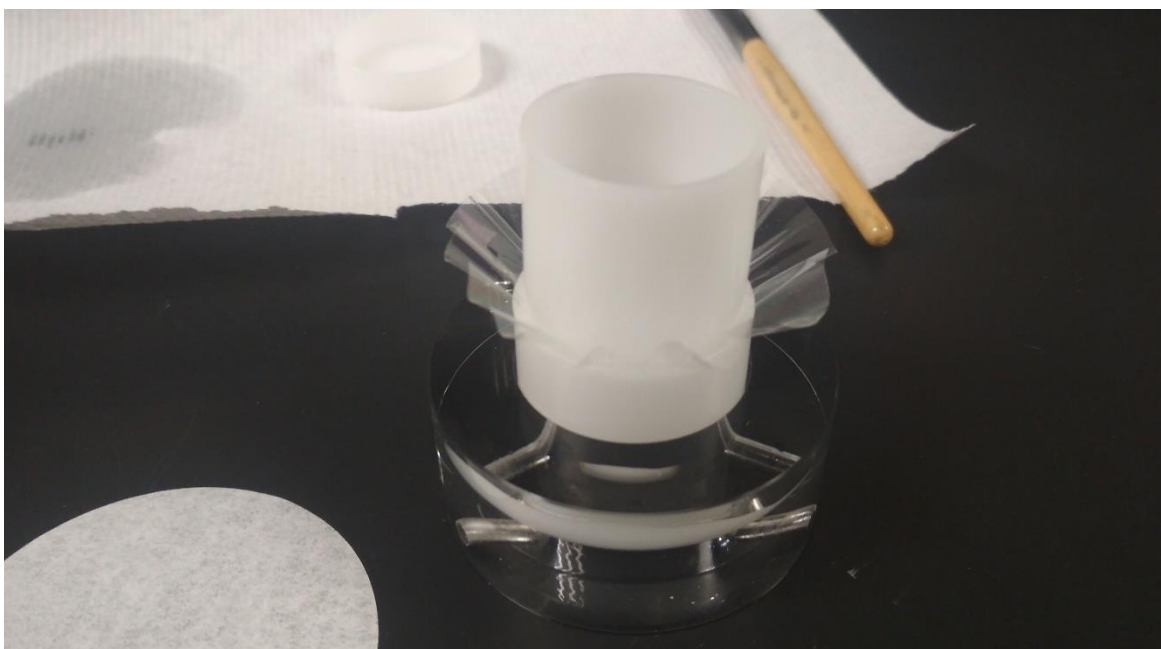


Figura 3-9 Porta muestras en proceso. Fuente: Propia



Figura 3-10 Porta muestra listo. Fuente: Propia

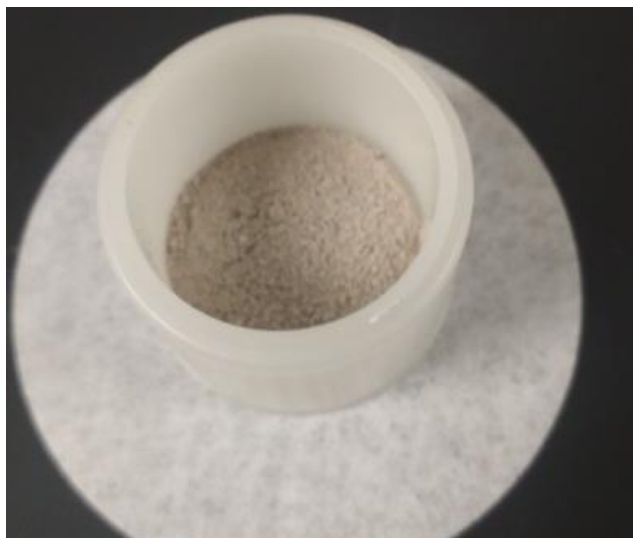


Figura 3-11 Muestra colocada en la porta muestra. Fuente: Propia



Figura 3-12 Se verifica la zona de lectura de material. Fuente: Propia



Figura 3-13 Porta Muestra cargado, colocado dentro del equipo de Fluorescencia de rayos X. Fuente: Propia

Se obtiene la composición química de las muestras.

Evaluar el Índice de actividad Hidráulica del material mediante la norma NMX-C-273-ONNCCE.

Materiales

La obtención de los materiales para evaluar el Índice de actividad Hidráulica se dio en dos etapas importantes:

1. El material para ensayar, la gallinaza que se consiguió se trató físicamente secándose al sol a temperatura ambiente como se muestra en la fotografía para reducir la humedad y el peso y así posteriormente pasarlas a calcinación dentro de la mufla a las temperaturas determinadas en el Análisis Termo Gravimétrico, 600 °C, 700°C y 800°C.

Calcinación de la gallinaza y molienda de las cenizas

La calcinación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Quintana Roo y la molienda de las cenizas obtenidas en la mufla se efectuó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Chetumal siguiendo el procedimiento descrito en Tabla 3-1 con las Figuras 3-14, 3-15, 3-16, 3-17, 3-18 y 3-19.

Tabla 3-1 Procedimiento realizado para la calcinación de la gallinaza a 600 °C, 700 °C, 800 °C Fuente: Propia



Figura 3-14 Secado al sol



Figura 3-15 Cribado



Figura 3-16 Crisoles para calcinación



Figura 3-17 Calcinación



Figura 3-18 Molienda de la ceniza



Figura 3-19 Cribado Malla #200

2. Los materiales para elaborar las pastas cementantes a ensayar, el Cemento portland compuesto 30R y la arena graduada, el primero fue comprado con un distribuidor local de la ciudad de Chetumal, al que se le pidió fuese un Cemento de reciente entrega y tener un Cemento sin reacción debido a humedad por almacenamiento prolongado, la arena graduada se obtuvo de un banco de material de la región ubicado en , se sometió a pruebas y posterior a un secado general del material se graduó hasta obtener la granulometría recomendada por la NMX-C-273-ONNCCE.

En las imágenes siguientes se describe el procedimiento para obtener la arena graduada utilizada en el desarrollo de la investigación:

Tabla 3-2 Procedimiento para graduar las arenas



Figura 3-20 Recolecta en banco de material

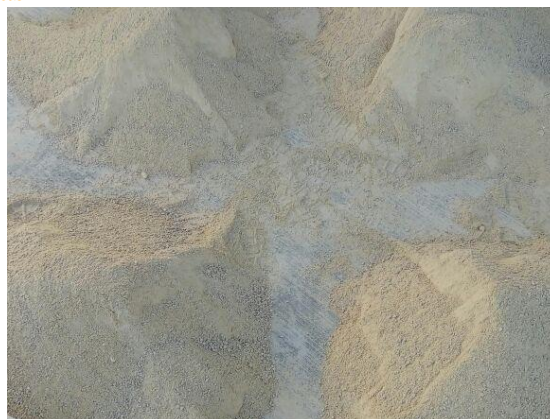


Figura 3-21 Cuarteo del material



Figura 3-22 Cribado y selección del tamaño de grano



Figura 3-23 Dosificación según normativa

Proporcionamiento

Dentro de los parámetros a conocer es la cantidad de agua a utilizar en la elaboración de las probetas por lo que se propusieron distintas relaciones agua/Cemento hasta alcanzar un parámetro aceptable de fluidez, así como la mayor resistencia posible (Ver Anexo A).

El proporcionamiento utilizado en la primera etapa tanto para la pasta cementante testigo como para las cenizas obtenidas a 600 °C, 700°C y 800 °C se muestra en las Tablas 3-5, 3-6, 3-7 y 3-8 correspondientes.

Tabla 3-3 Proporciones para pasta cementante testigo (6 cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	500 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Tabla 3-4 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 600°C (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	400 g
<i>Ceniza de Gallinaza a 600°C</i>	100 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Tabla 3-5 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 700°C (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	400 g
<i>Ceniza de Gallinaza a 600°C</i>	100 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Tabla 3-6 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	400 g
<i>Ceniza de Gallinaza a 600°C</i>	100 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Procedimiento de prueba

Tabla 3-7 Procedimiento realizado en laboratorio para elaboración y ruptura de probetas de 5cm x 5 cm x 5cm



Figura 3-24 Peso de la arena



Figura 3-25 Peso de la ceniza



Figura 3-26 Mezclado de los materiales a



Figura 3-27 Mezclado de los materiales b



Figura 3-28 Ensayo fluidez a



Figura 3-29 Ensayo fluidez b



Figura 3-30 Ensayo fluidez c



Figura 3-31 Ensayo fluidez d



Figura 3-32 Moldeado de especímenes a



Figura 3-33 Moldeado de especímenes b



Figura 3-34 Curado a



Figura 3-35 Curado b



Figura 3-36 Prueba de compresión a



Figura 3-37 Prueba de compresión b

Etapa 2: Determinación del porcentaje de sustitución con mayor desarrollo de la resistencia a la compresión de la pasta cementante.

Materiales

La obtención de los materiales para evaluar el Índice de actividad Hidráulica se dio en dos etapas importantes:

1. El material para ensayar, la gallinaza que se consiguió se trató físicamente secándose al sol a temperatura ambiente como se muestra en la fotografía para reducir la humedad y el peso y así posteriormente pasarlas a calcinación dentro de la mufla a las temperaturas determinadas en la etapa 1: 800°C.

Calcinación de la gallinaza y molienda de las cenizas

La calcinación se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Quintana Roo y la molienda de las cenizas obtenidas en la mufla se efectuó en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Chetumal siguiendo el procedimiento descrito en la Tabla 3-10 que contiene las imágenes 3-38, 3-39, 3-40, 3-41, 3-42 y 3-43.

Tabla 3-3 Procedimiento realizado para la calcinación de la Gallinaza a 800 °C



Figura 3-38 Secado al sol de la gallinaza



Figura 3-39 Cribado de la gallinaza



Figura 3-40 Uso de crisoles para calcinación



Figura 3-41 Calcinación en mufla



Figura 3-42 Molienda de la ceniza



Figura 3-43 Cribado por la malla #200 de la ceniza

2. Los materiales para elaborar las pastas cementantes a ensayar, el Cemento portland compuesto 30R y la arena graduada, el primero fue comprado con un distribuidor local de la ciudad de Chetumal, al que se le pidió fuese un Cemento de reciente entrega y tener un Cemento sin reacción debido a humedad por almacenamiento prolongado, la arena graduada se obtuvo de la misma forma que en la etapa 1.

Proporcionamiento

El proporcionamiento utilizado en la segunda etapa correspondiente a la sustitución parcial de Cemento portland en un 10%, 15% y 20% se muestra en las siguientes Tablas 3-11, 3-12, 3-13 y 3-14:

Tabla 3-4 Proporciones para pasta cementante testigo (6 cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	500 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Tabla 3-5 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C en un 10% de sustitución (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	450 g
<i>Ceniza de Gallinaza a 600°C</i>	50 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Tabla 3-6 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C en un 15% de sustitución (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	425 g
<i>Ceniza de Gallinaza a 600°C</i>	75 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Tabla 3-7 Proporciones para pasta cementante adicionada con ceniza de gallinaza a 800°C en un 20% de sustitución (6 Cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm)

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	400 g
<i>Ceniza de Gallinaza a 600°C</i>	100 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	387.5

Procedimiento de prueba

El procedimiento de prueba utilizado es el mismo descrito en la etapa 1.

Capítulo 4. Resultados y Análisis

Etapla 1: Caracterización de los materiales y determinación de la temperatura de calcinación.

Análisis Termo Gravimétrico (ATG)

El ATG se realizó en una muestra de gallinaza cribada por la malla No. 10 con un peso total de 41.58 mg, en una atmósfera de Oxígeno, un ambiente oxidante a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min hasta los 900°C.

De la gallinaza se obtuvieron los siguientes resultados representados en la Figura 4-6.

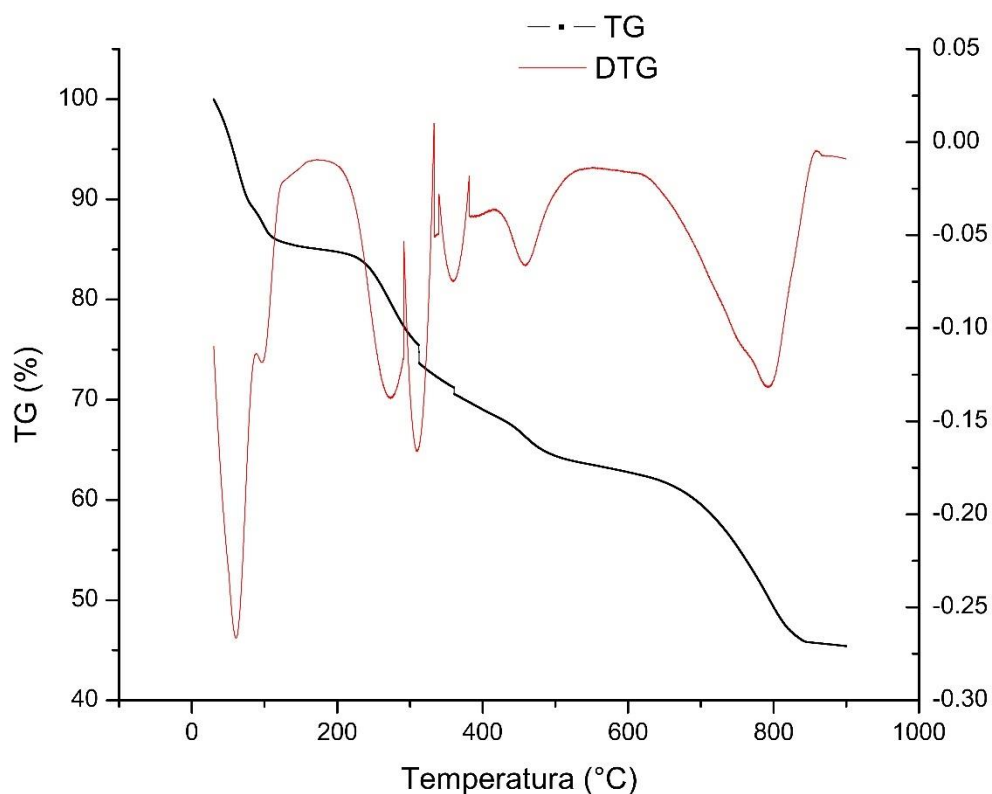


Figura 4-1 Análisis Termo Gravimétrico de la gallinaza. Fuente: Propia.

Nuestro material presenta cuatro pérdidas de peso significativas (Figura 4-7) siendo más aproximadas a las publicadas por Cimo et al., (2014), quienes proponen 4 áreas definidas de pérdidas de peso en este tipo de material, la primera región entre 40°C a 210°C se debe a la pérdida de humedad, una segunda región de 210°C a 420°C, atribuida a la transformación térmica de los carbohidratos y sistemas lábiles de alquilo, una tercera región de 420°C a 570°C caracterizada por la transformación de restos aromáticos y una última región entre 600°C y 800°C referente a la degradación de sales minerales y biogénicas, principalmente carbonatos de calcio y de potasio.

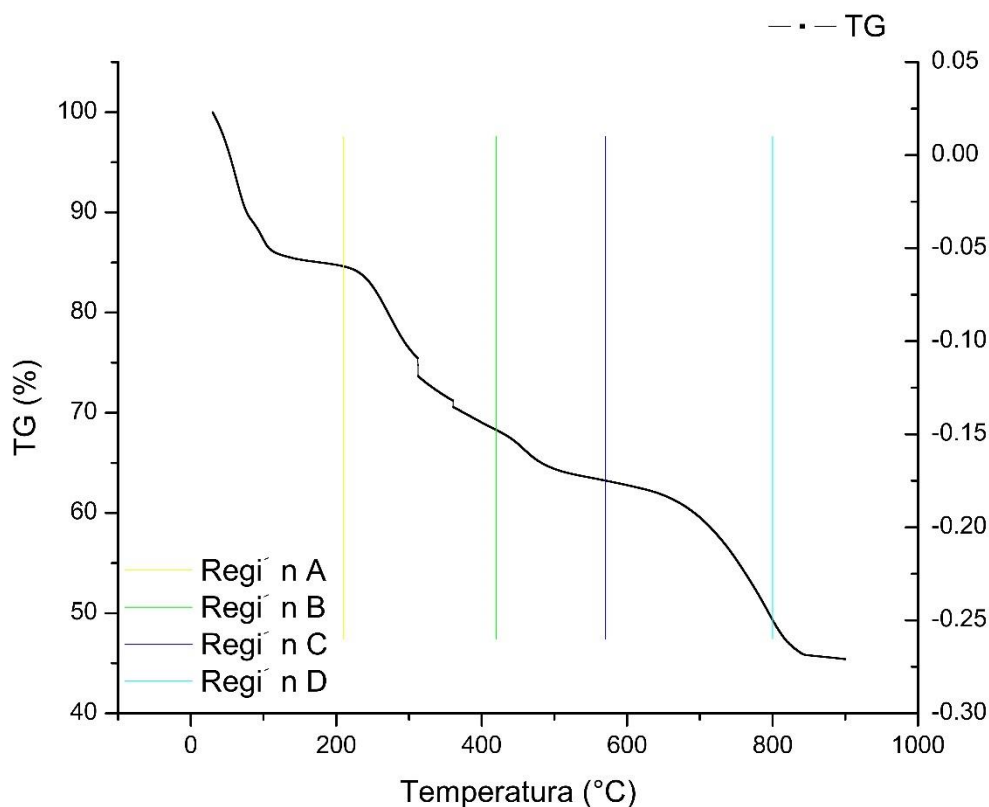


Figura 4-2 Análisis Termo Gravimétrico de la ceniza de gallinaza señalando las cuatro principales regiones de la descomposición térmica. Fuente: Propia.

A partir del ATG y DATG (Figura 4-6) se determinó realizar el tratamiento térmico a 600°C, 700°C, 800°C, ya que ocurre el último cambio de estado a los componentes inorgánicos presentes en la gallinaza, tomando un antes, durante y después del cambio.

Wilson, Yang, Blasiak, John, & Mhilu, (2011) realizaron Análisis Termo Gravimétricos sobre 5 diferentes desechos agrícolas Cáscara de café (Figura 4-3), Bagazo de molino (Figura 4-4), cáscara de nuez de anacardo (Figura 4-5), tronco de agave (Figura 4-6) y tallo de palma (Figura 4-7), se utilizó una atmosfera de nitrógeno, un ambiente inerte, a una velocidad de 10 K/min desde la temperatura ambiente hasta los 1400 °C, el Análisis Termo Gravimétrico calculó el cambio en la masa debido a la evaporación, descomposición y la interacción con la atmosfera del horno, también llevaron a cabo un Análisis de Calorimetría Diferencial de barrido para caracterizar los procesos físicos y químicos relacionados con el tratamiento térmico.

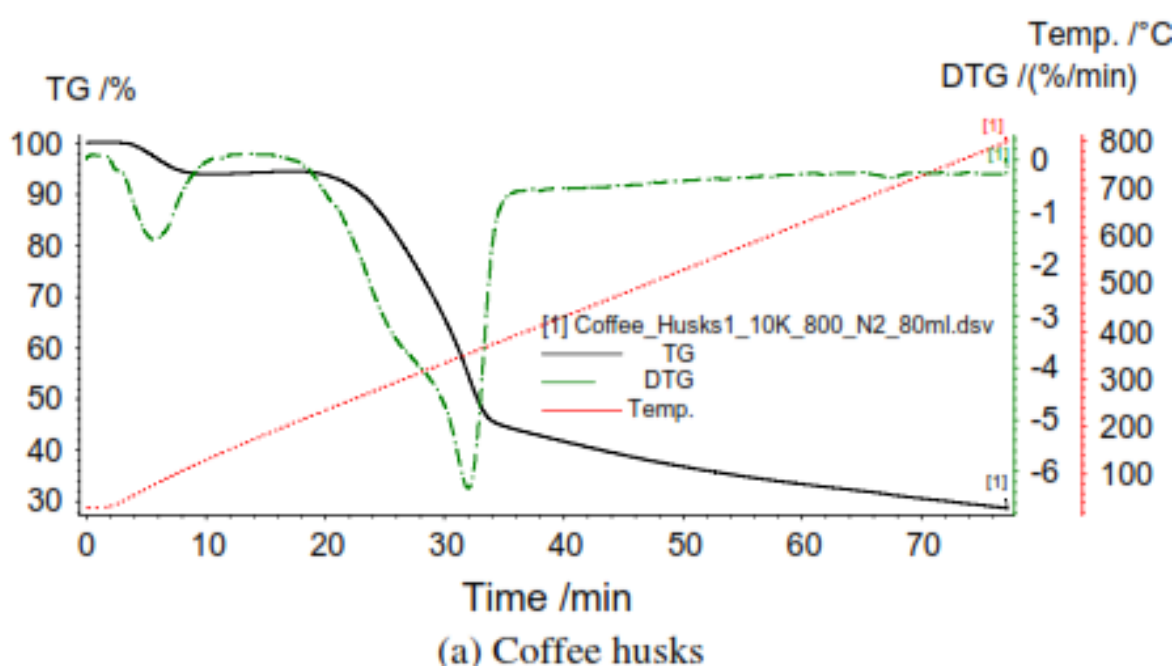
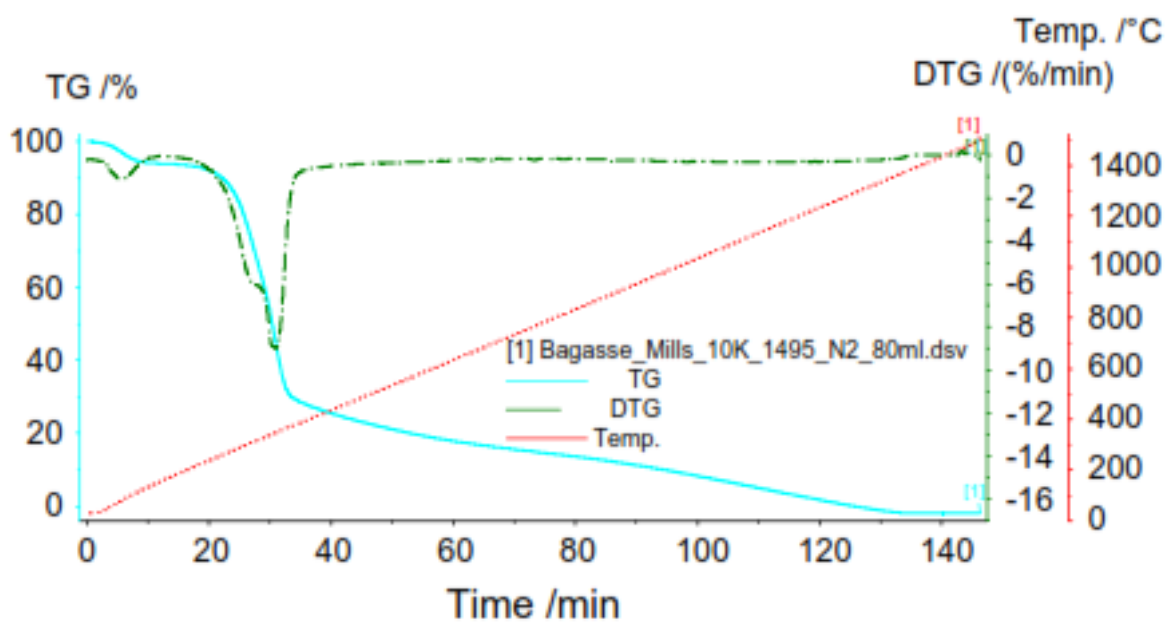
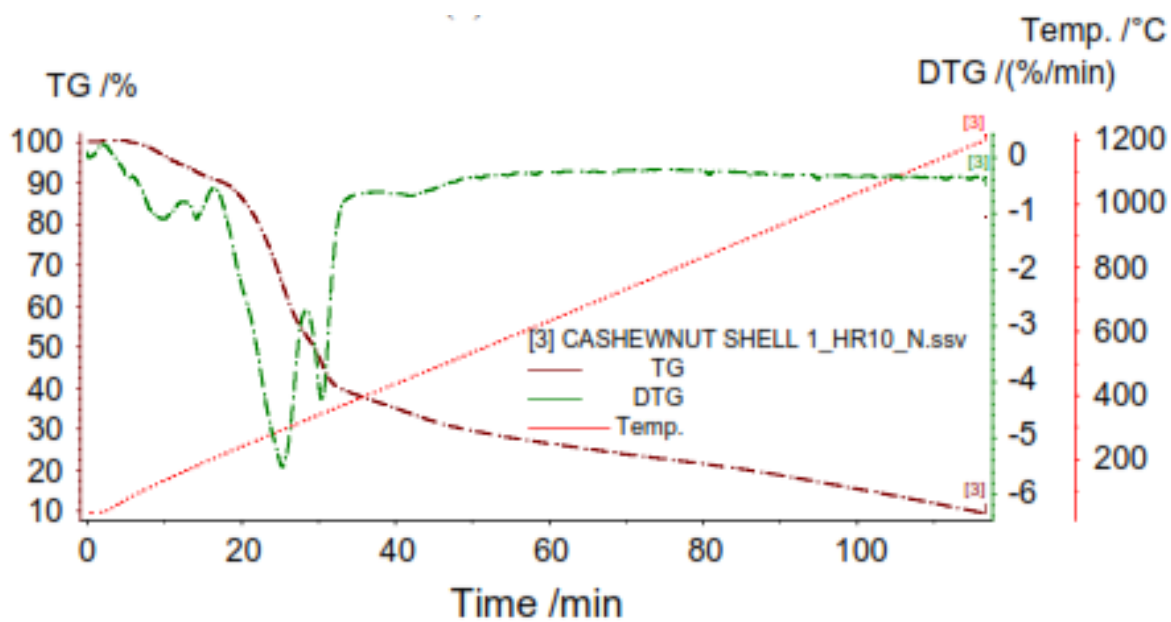


Figura 4-3 Análisis Termo Gravimétrico de la cáscara de café.



(b) Mill bagasse

Figura 4-4 Análisis Termo Gravimétrico del bagazo de molino



(c) Cashew nut shells (CNS)

Figura 4-5 Análisis Termo Gravimétrico de cáscara de nuez de anacardo

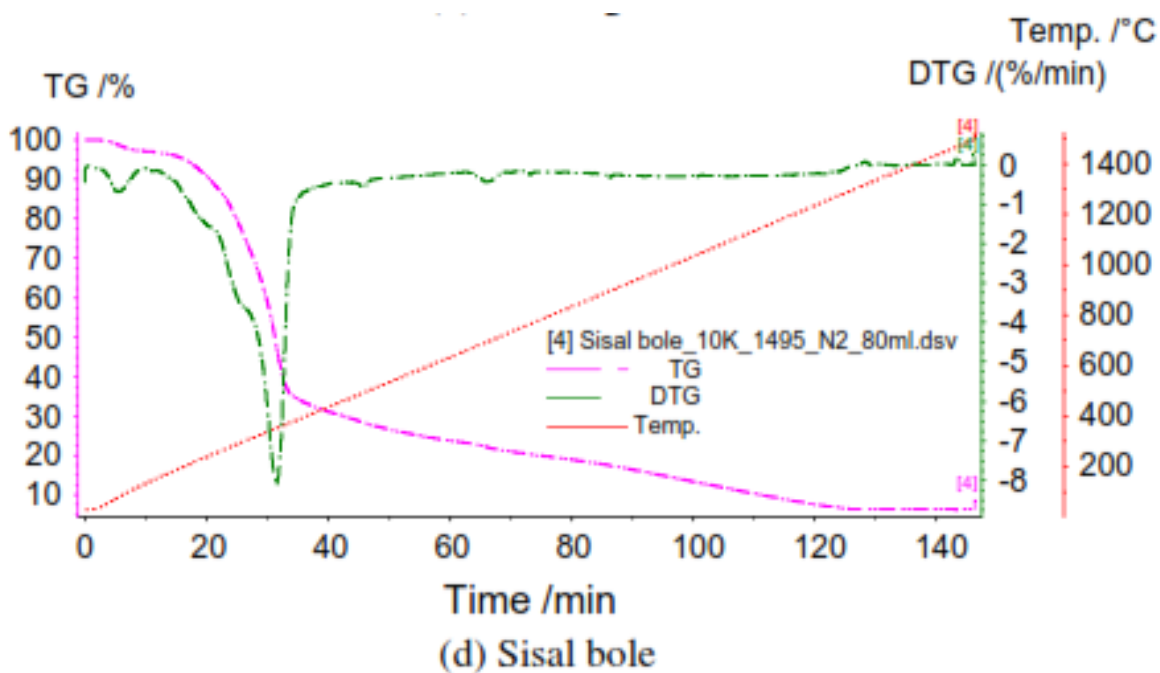


Figura 4-6 Análisis Termo Gravimétrico del tronco de agave

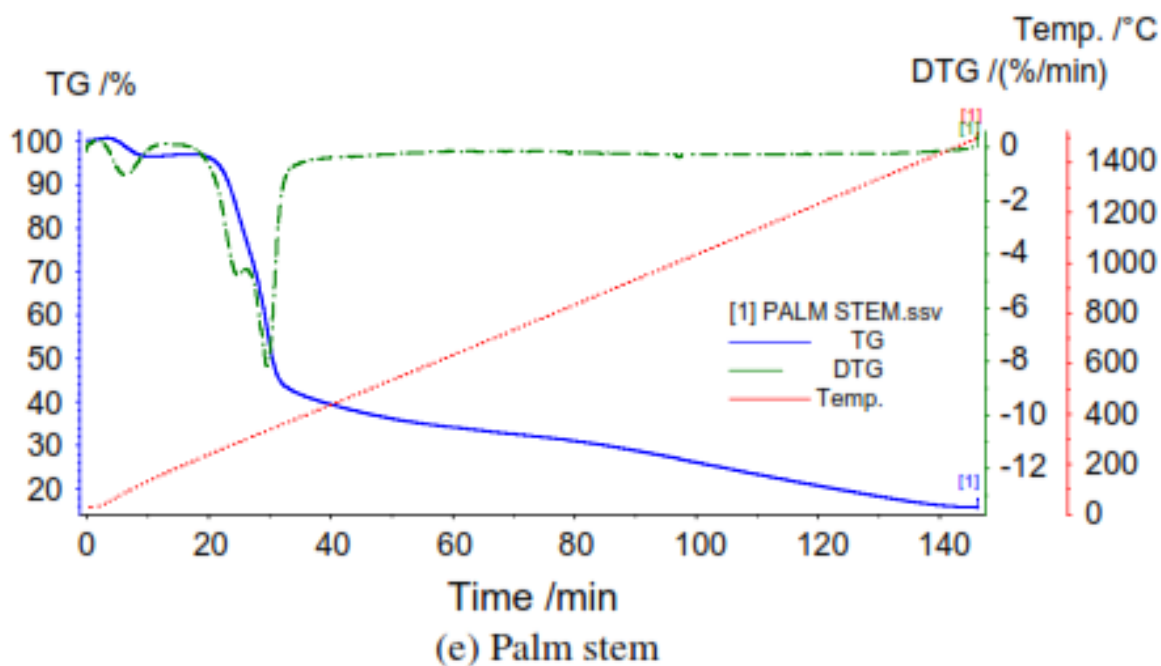


Figura 4-7 Análisis Termo Gravimétrico del tallo de palma

Wilson et al., (2011) observaron en estas gráficas en el comportamiento de la cáscara de nuez de anacardo y el tallo de palma dos picos característicos de las biomásas, es sabido que

el primer pico es resultado de la descomposición o de la hemicelulosa mientras el segundo pico corresponde a la degradación de la celulosa, contrariamente a lo visto en los perfiles de la cáscara de café, el bagazo de molino y el tronco de agave, virtualmente presenta un solo pico en el que el primero y el segundo casi coinciden. El hecho de que la gráfica diferencial del termograma muestre dos distintos picos indica que estos materiales están formados principalmente por dos pseudo componentes independientes.

Kim & Agblevor, (2007) realizaron un Análisis Termo Gravimétrico sobre el excremento de pollos de engorda que recuperaron directamente de las granjas, esta muestra fue molida y con 20 mg de ella, se llevó a cabo el estudio en una atmosfera de nitrógeno, variando la velocidad de calentamiento de 5 °c/min, 10 °c/min y 20 °c/min, llegando de 25°c a 700 °c, encontraron que la descomposición del material se presenta en tres momentos en que se pierde peso, sin existir una diferencia significativa en las tres velocidades de calentamiento, observaron que estas se dan entre 270°C y 550°C, el primer estado se presenta entre 270 °C y 370 °C con casi un 50% de perdida, se atribuye principalmente a la celulosa y hemicelulosa en su descomposición térmica. El segundo momento ocurre entre los 375 °C y 500 °C el cual se atribuye a la lignita y el tercer y último estado entre 500 °C y 550 °C atribuido de la desvolatilizado del carbón.

Niu et al., (2010) incineraron tallos de pimiento, tallos de algodón y tallo de trigo a diferentes temperaturas obteniendo diferentes resultados para los termograma a partir de los cuales dedujeron los comportamientos de las cenizas, estas cenizas fueron estudiadas mediante Fluorescencia de rayos x (Tabla 4-1) y Difracción de rayos X para conocer los distintos compuestos que se forman debido al incremento de la temperatura.

Tabla 4-1 Resultados del análisis por Fluorescencia de rayos X de los tallos de pimiento, tallos de algodón y tallo de trigo.

Resultados del análisis por Fluorescencia de rayos X									
Muestra	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Cl=0
CMS400	27.18	1.40	9.37	19.94	3.55	7.43	29.64	0.42	1.08
CMS600	23.22	1.39	11.40	21.47	3.69	7.89	29.42	0.41	1.12
CMS815	18.85	1.43	12.56	22.90	4.10	8.47	31.19	0.46	0.03
CNS400	47.27	5.75	7.57	20.85	3.16	2.35	8.76	0.18	4.11

CNS600	43.84	9.88	7.60	20.32	3.07	2.22	8.45	0.19	4.43
CNS815	30.52	5.16	12.05	27.83	4.25	3.53	16.49	0.17	0.00
WTS400	36.13	0.37	3.90	14.24	1.04	1.95	39.60	0.14	2.62
WTS600	35.49	0.53	4.57	15.44	1.05	2.18	37.73	0.13	2.88
WTS815	29.99	0.78	7.01	19.27	1.35	3.63	37.70	0.23	0.04

Con el incremento de la temperatura de calcinación, el contenido relativo del K_2O cae, mientras MgO , CaO , Fe_2O_3 y Al_2O_3 incrementa, así el Cl es cercano a cero con un ligero incremento a $600\text{ }^\circ\text{C}$.

A partir de sus resultados se infiere que no importa que temperatura de incineración se alcance, cuando el valor de calentamiento sea mayor a cierta temperatura, la composición de las cenizas es cercanamente la misma. Lo que para nosotros indica que una vez pasada la temperatura de $800\text{ }^\circ\text{C}$ momento en que inicia la última región de estabilidad térmica del material la gallinaza no mostrara mayores cambios en su composición aun incrementando la temperatura.

Las muestras que se presentan en la Tabla 4-2, se trataron a sus respectivas temperaturas (600°C , 700°C , 800°C) durante 120 min a una velocidad de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

Tabla 4-2 Muestras obtenidas de los tratamientos térmicos. Fuente: Propia

Temperatura	Código	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Ceniza (%)
600°C	G600	13.54	8.19	60.48
700°C	G700	13.24	7.79	58.83
800°C	G800	15.35	6.95	45.27

Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X

La Tabla 4-3 indica la nomenclatura de la muestra, así como el tratamiento al que fue sometido antes de llevar a cabo los análisis de Difracción de rayos X y Fluorescencia de rayos X.

Tabla 4-3 Tratamiento de muestras para la gallinaza

Muestra	Tratamiento	Temperatura °C
G	Cribado y Secado	Ambiente
G600	Cribado y Calcinado	600
G700	Cribado y Calcinado	700
G800	Cribado y Calcinado	800

La muestra G tiene como principal componente el calcio, fósforo, silicio y potasio lo cual se aprecia en la Tabla, de acuerdo a investigaciones anteriores el alto contenido de calcio se debe principalmente a la alimentación de las gallinas (FAO, 2013a), así como del material con que está echo la cama, en nuestro caso está compuesta por cascarilla de arroz lo que nos indica el contenido de silicio; el fosforo y el potasio se encuentran presentes en la biomasa en general.

Existe una clasificación general de las diversas variedades de recursos solidos combustibles según su diversidad biológica, fuente y origen (Vassilev, Baxter, Andersen, & Vassileva, 2010); la gallinaza es una biomasa catalogada como biomasa de residuos animales y humanos, que se compone de materia orgánica y materia inorgánica.

La materia orgánica está constituida por solidos no cristalinos y solidos cristalinos, los cuales se dividen en celulosa, hemicelulosa, lignina y minerales orgánicos como Ca-Mg-K-Na oxalatos y otros (Vassilev, Baxter, Andersen, Vassileva, & Morgan, 2012), en la Tabla 4-4 podemos apreciar los valores que presenta la biomasa, esa variedad es una de las características que dominan el comportamiento térmico de los materiales expuestos.

La materia inorgánica está constituida por sólidos cristalinos, sólidos semi cristalinos y sólidos amorfos, como lo son las especies minerales de diferentes clases minerales (silicatos, oxihidróxidos, sulfatos, fosfatos, carbonatos, cloruros, nitratos y otros) (Vassilev et al., 2012).

La composición química de la biomasa y especialmente de los componentes de la ceniza son altamente variables gracias a las diferencias en el contenido de humedad, al rendimiento de la ceniza y a los diferentes tipos genéticos de la materia inorgánica constituyente de la biomasa (Vassilev et al., 2012).

Tabla 4-4 Contenido de los componentes estructurales. Tomado de Vassilev et al., (2012).

Biomasa	Celulosa	Hemicelulosa	Lignita
Pasto Elefante	31.5	34.3	34.2
Cascarilla de Arroz	43.8	31.6	24.6
Bagazo de Caña de Azúcar	42.7	33.1	24.2
Estiércol Bovino	32.7	24.5	42.8
Gallinaza	27.89	39.75	32.27

Tabla 4-5 Composición Química de la Gallinaza. Fuente: Propia.

CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	MgO	Cl	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
42.917	13.048	12.498	11.487	8.874	4.693	2.163	1.865	1.55	0.149

Sato et al., (2013) determinó que los principales componentes son Ca, K y P, mediante análisis aproximado lo que respalda el resultado obtenido en la Tabla 4-5.

La Difracción de rayos X (Tabla 4-6) arrojo la presencia de formaciones cristalográficas de calcita, cuarzo, estruvita y dolomita.

La calcita ha sido encontrada por otros investigadores en la gallinaza sin tratar (Kaneko, Li, Shimizu, Matsumura, & Takarada, 2014; Sato et al., 2013), los patrones exhiben calcita cristalina y fosfatos de calcio.

La estruvita así como otras escasas formas solubles del fósforo (P), como fosfato de calcio, se forman durante el almacenamiento, ya sea en estado húmedo o seco (Hunger, Sims, & Sparks, 2008).

La dolomita se encuentra presente debido al contenido de carbonatos existentes en el material de forma natural.

Tabla 4-6 Patrones de Difracción para la gallinaza. Fuente: Propia.

Nombre	Fórmula	PDF
Calcita	CaCO ₃	47-1743
Cuarzo	SiO ₂	46-1045
Estruvita	NH ₄ MgPO ₄ ·6H ₂ O	15-0762
Dolomita	CaMg (CO ₃) ₂	36-0426

Tabla 4-7 Composición Química de la Ceniza tratada a 600 °C. Fuente: Propia

CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	MgO	Cl	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
47.937	13.828	13.403	7.735	5.798	5.636	1.641	2.386	1.061	0.104

Patrones de Difracción de rayos X (Tabla 4-8) encontrados en el tratamiento térmico a 600 °C, la estruvita y la dolomita se descomponen al incremento de la temperatura de tratamiento (Vassilev, Baxter, & Vassileva, 2013).

La hidroxiapatita se ha encontrado por otros autores (Komiyama, Kobayashi, & Yahagi, 2013) en excremento de gallinas y pollos de engorda, este compuesto representa los fosfatos característicos de la biomasa calcinada.

Tabla 4-8 Patrones de Difracción para la gallinaza a 600 °C. Fuente: Propia.

Nombre	Formula	PDF
Calcita	CaCO ₃	47-1743
Cuarzo	SiO ₂	46-1045
Hidroxiapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	09-0432
Silvita	KCl	41-1476
Hierro	Fe	39-1346

Resultados de Fluorescencia de rayos x (Tabla 4-9) comienzan a mostrar los cambios debido al des volatizado del carbón y ligero incremento de la composición química en los minerales no volátiles.

Tabla 4-9 Composición Química de la Ceniza tratada a 700 °C. Fuente: Propia

CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	MgO	Cl	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
54.790	11.942	11.540	6.398	4.589	5.795	1.352	2.060	0.971	0.091

Tabla 4-10 Patrones de Difracción para la gallinaza a 700 °C. Fuente: Propia.

Nombre	Formula	PDF
Calcita	CaCO ₃	47-1743
Cuarzo	SiO ₂	46-1045
Hidroxiapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	09-0432
Oxido de Calcio	CaO	
Silvita	KCl	41-1476
Hierro	Fe	39-1346

Tabla 4-11 Composición química de la Ceniza tratada a 800 °C.

CaO	P ₂ O ₅	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	MgO	Cl	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
52.763	12.787	12.102	6.443	4.618	6.357	1.397	2.075	0.964	0.083

Los patrones de Difracción de rayos X (Tabla 4-12) encontrados para este tratamiento a 800 °C son, en comparación con los otros tratamientos, la transformación de la calcita a óxido de calcio (Cal) como se propuso anteriormente en el Análisis Termo Gravimétrico de la gallinaza.

Acharya et al., (2014) mencionan que las estructuras principalmente encontradas por otros investigadores en las cenizas producidas a temperaturas mayores a 800 °C se mantienen constantes hasta los 1000°C de tratamiento, solo incrementándose la intensidad de algunos

picos debido al incremento de las estructuras cristalinas producidas por el incremento de la temperatura como el Calcio o Cuarzo.

Tabla 4-12 Patrones de Difracción para la gallinaza a 800 °C. Fuente: Propia.

Nombre	Formula	PDF
Calcio	CaO	48-1467
Cuarzo	SiO ₂	46-1045
Silvita	KCl	41-1476
Aluminio	Al ₂ O ₃	23-1009

Comparación de las muestras G, G600, G700, G800.

Fluorescencia de Rayos X (Tabla 4-13)

La FRX indica un alto contenido de calcio, potasio y fósforo, esto se debe a la procedencia del material y a la dieta que llevan las aves en las granjas (FAO, 2013a), el cambio en la cantidad presente de estos compuestos al incremento de la temperatura, nos comprueba los cambios en las fases cristalinas de la DRX y los cambios de peso presentes en el ATG.

Tabla 4-13 Comparación de la composición química de las muestras. Fuente: Propia.

Elemento	G	G600	G700	G800
CaO	42.917	47.937 ↑	54.790 ↑	52.763 ↓
P ₂ O ₅	13.048	13.828 ↑	11.942 ↓	12.787 ↑
SiO ₂	12.498	13.403 ↑	11.540 ↓	12.102 ↑
K ₂ O	11.487	7.735 ↓	6.398 ↓	6.443 ↑
SO ₃	8.874	5.798 ↓	4.589 ↓	4.618 ↑
MgO	4.693	5.636	5.795	6.357

			↑		↑		↑
Cl	2.163	1.641	↓	1.352	↓	1.397	↑
Al₂O₃	1.865	2.386	↑	2.060	↓	2.075	↑
Fe₂O₃	1.55	1.061	↓	0.971	↓	0.964	↓
TiO₂	0.149	0.104	↓	0.091	↓	0.083	↓

Tabla 4-14 Comparación de los patrones de Difracción de Rayos X de las muestras. Fuente: Propia.

Patrón	G	G600	G700	G800
Calcita	x	x	x	
Cuarzo	x	x	x	x
Estruvita	x			
Dolomita	x			
Hidroxiapatita		x	x	
Silvita		x	x	x
Hierro		x	x	
Calcio			x	x
Aluminio				x

Encontramos dentro de la DRX (Tabla 4-14 y Figura 4-8), principalmente calcita, cuarzo, Estruvita, Silvita y Calcio, compuestos cristalográficos que han encontrado otros investigadores (Acharya et al., 2014; Hunger et al., 2008; Kaneko et al., 2014; Kongsomart et al., 2015; Lynch et al., 2013; Sato et al., 2013), a diferentes temperaturas van cambiando estos compuestos, en la Figura 4-8 se aprecia el cambio en los picos característicos a mayor temperatura..

Vassilev, Baxter, & Vassileva, (2014) proponen los mecanismos más comunes de la formación de cenizas a partir de la biomasa, en nuestro caso de las catalogadas como cenizas tipo CK subtipo LA, esto es debido a los principales componentes descritos por la Fluorescencia de rayos X (Tabla 4-15), así como los componentes cristalográficos descritos, clasificación propuesta por los mismos investigadores a partir de una extensa revisión de la literatura científica.

Tabla 4-15 Composición Química de las Cenizas Tipo CK y las muestras. Fuente: Propia.

Muestra	SiO ₂	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	TiO ₂
Tipo "CK"	7.37	37.03	25.36	11.06	2.81	8.58	1.30	4.32	2.03	0.14
G	12.50	42.92	11.49	13.05	1.87	4.69	1.55	8.87		0.15
G600	13.40	47.94	7.74	13.83	2.39	5.64	1.06	5.80		0.10
G700	11.54	54.79	6.40	11.94	2.06	5.80	0.97	4.59		0.09
G800	12.10	52.76	6.44	12.79	2.08	6.36	0.96	4.62		0.08

Durante la primera etapa de la calcinación la gallinaza, a partir de sus componentes iniciales (Calcita, Cuarzo, Estruvita, Dolomita), se inician la formación de hidróxidos, carbonatos y sulfatos de mediana y menor estabilidad (Hidroxiapatita, Silvita), en la segunda etapa se generan silicatos, fosfatos y óxidos más estables (Hierro y Calcio). El incremento de la temperatura lleva a los componentes a una tercera etapa de fundido de los elementos acompañada de una mediana disolución de minerales refractarios (aluminio) (Tabla 4-14).

El caso de la calcita y tomando en cuenta el ATG, determinamos que entre 700°C y 800°C se produce una des carbonatación dejando paso al oxido de Calcio solo presente a esta última temperatura, en el caso de la estruvita esta se transforma, la Silvita a su vez va perdiendo intensidad al aumento de temperatura de igual forma en la FRX comprobamos que disminuye la presencia del Potasio que la constituye.

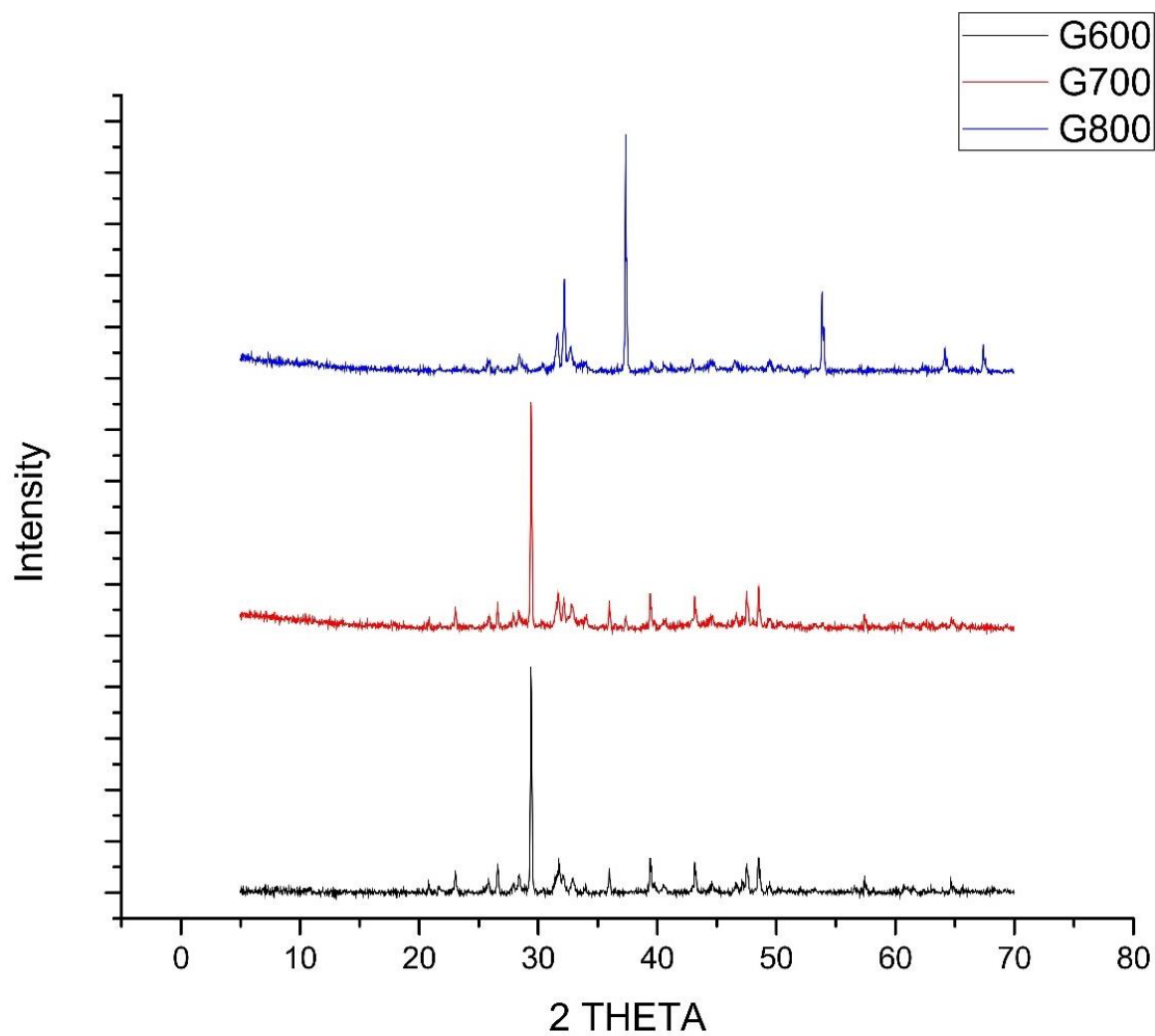


Figura 4-1 Difracción de Rayos X de las cenizas de Gallinaza. Fuente: Propia

Vassilev, Baxter, Andersen, & Vassileva, (2013) proponen, para este tipo de cenizas catalogadas como tipo CK, un uso en los siguientes campos de aplicación de la Tabla.

Tabla 4-16 Campos de aplicación industrial para las cenizas tipo CK. Tomado de: Vassile, Baxter, Andersen & Vassileva (2013).

Carbón activado
Absorbentes (autolimpiado combustible y ceniza)
Aglutinantes para materiales de baja resistencia (morteros, albañilería, materiales cementantes)
Producción de Carbón Biológico
Ladrillos
Catalizadores
Cemento (portland) como mezcla mineral puzolánica y activador químico
Cerámicos
Concreto
Blocks de Construcción
Morteros Auto cementantes

Por lo que se procede a evaluar el Índice de actividad Hidráulica.

Evaluar el Índice de actividad Hidráulica del material mediante la norma NMX-C-273-ONNCCE.

La composición de seis especímenes es presentada en la Tabla 4-17, donde se presenta la sustitución de CPC con ceniza de gallinaza, la cual representa el 20% de sustitución en masa y una relación agua Cemento determinada en 0.775 para producir una mezcla homogénea, la arena fue graduada conforme recomendación de la norma NMX-C-273-ONNCCE para tener menor variabilidad en los resultados.

Tabla 4-17 Composición de los especímenes para evaluar el Índice de actividad Hidráulica.

Espécimen	Cemento (g)	Arena (g)	Ceniza (g)	Agua (g)	a/c
CPC	500	1375	0	387.5	0.775
G600	400	1375	100	387.5	0.775
G700	400	1375	100	387.5	0.775
G800	400	1375	100	387.5	0.775

El primer parámetro a evaluar en la elaboración de las muestras es la fluidez, conforme al aumento de la temperatura de tratamiento también se incrementó la fluidez en comparación a ellas mismas (Figura 4-9), en comparación a la muestra control la fluidez fue menor, esto nos indica que la gallinaza tiene un alto contenido de inquemados ya que, cenizas con grandes valores de inquemados consumen más agua y esto determina el cambio sustancial de las propiedades reológicas (en este caso la fluidez) de pastas elaboradas con este tipo de materiales (Nakanishi et al., 2014).

A mayor temperatura de tratamiento, menor cantidad de inquemados y mayor fluidez, aunado a esta característica, la morfología de las cenizas también incrementa o reduce las propiedades reológicas, a mayor temperatura de calcinación la ceniza de gallinaza va tomando una forma mayormente esférica (Acharya et al., 2014), lo que beneficia a la trabajabilidad de las mezclas.

Sata, Tangpagasit, Jaturapitakkul, & Chindaprasirt, (2012), elaboraron muestras de pastas cementantes con ceniza de cascarilla de arroz (Inquemados 3.72) y ceniza de palma de aceite

(Inquemados 10.05), propusieron relación a/c de 0.575 y sustituciones del 10 %, 20 %, 30% y 40% y obtuvieron los resultados a los 28 días que se muestran en la Tabla 4-18:

Tabla 4-18 Índice de Actividad Hidráulica de la ceniza de cascarilla de arroz y la ceniza de palma de aceite. Tomado de: Sata, Tangpagasit, Jaturapitakkul, & Chindaprasirt, (2012).

Muestra	Control	MRHBA10	MRHBA20	MRHBA30	MRHBA40
IAH	100	102.0	109.8	97.3	85.0
Muestra	Control	MPOFA10	MPOFA20	MPOFA30	MPOFA40
IAH	100	98.9	98.2	89.5	79.9

La ceniza de palma de aceite tiene una mayor cantidad de inquemados y muestra una menor resistencia que la ceniza de cascarilla de arroz.

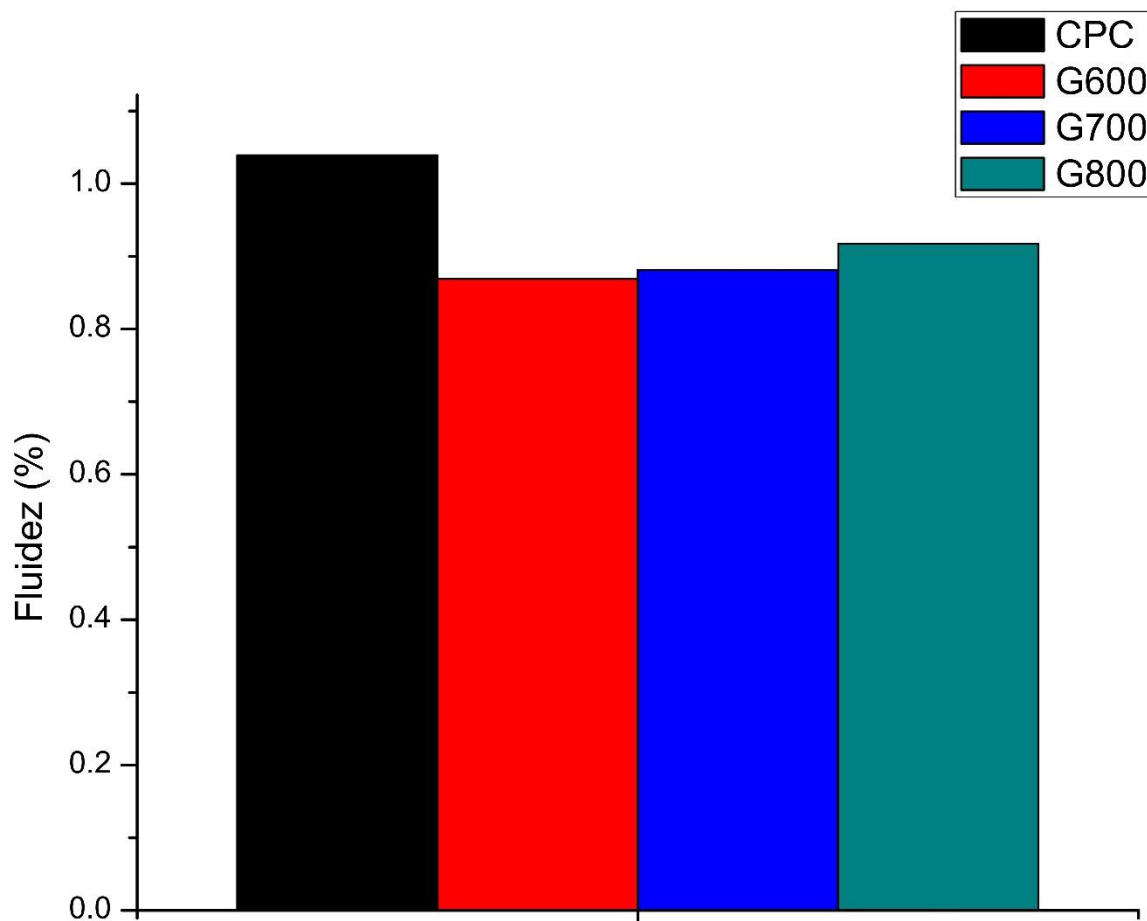


Figura 4-2 Porcentaje de fluidez alcanzado por las muestras elaboradas de CPC, G600, G700, G800. Fuente: Propia.

Los especímenes fueron probados a la edad de 28 días de curado y los resultados son ilustrados en la Figura 4-10.

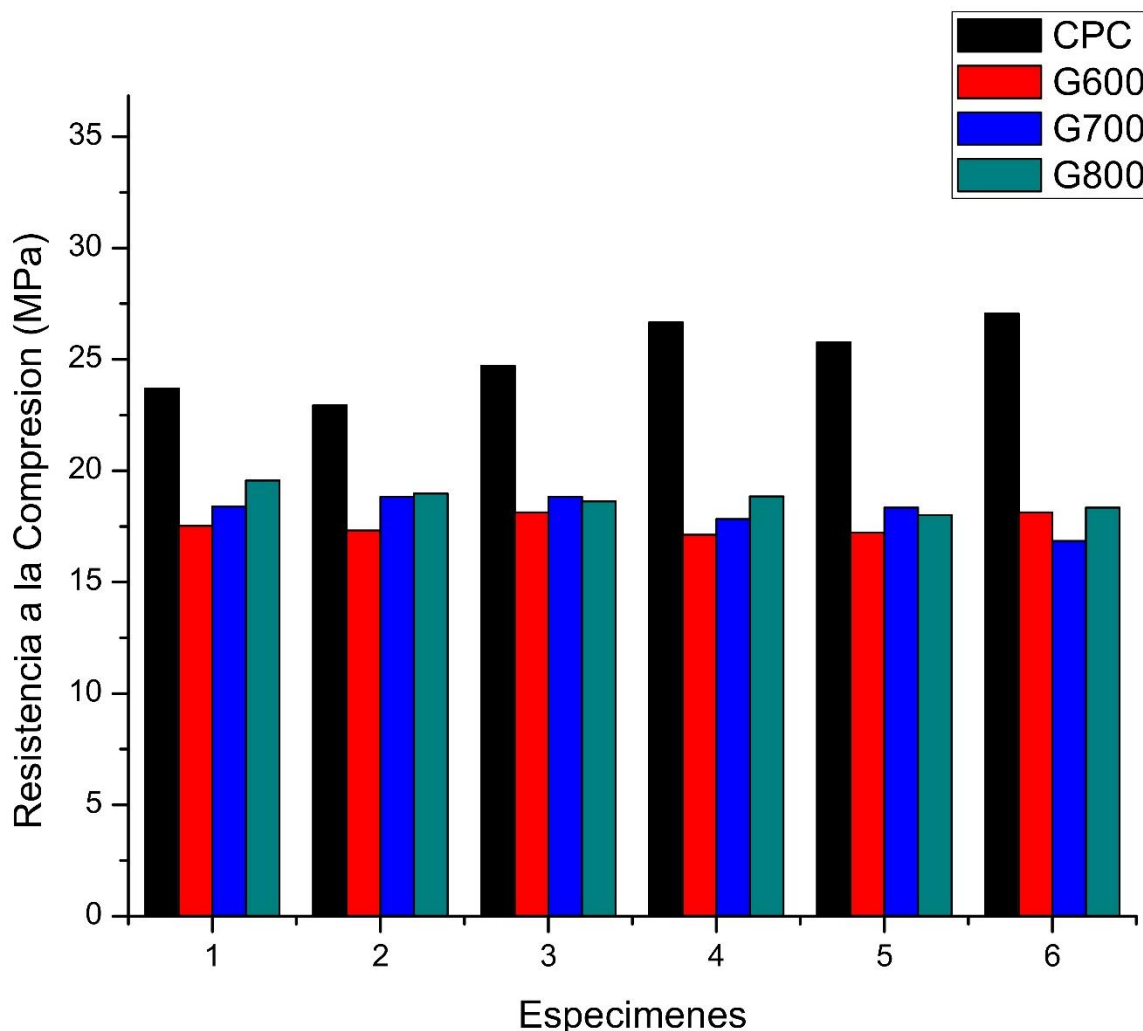


Figura 4-3 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC, G600, G700, G800. Fuente: Propia.

Ninguna de las muestras elaboradas con ceniza de gallinaza superó la resistencia alcanzada por la muestra testigo elaborada con Cemento portland compuesto.

En la siguiente Tabla 4-19 se muestran los valores promedios alcanzados por las muestras elaboradas con las tres sustituciones al 20% de Cemento portland compuesto por ceniza de gallinaza tratada en tres diferentes temperaturas de calcinación.

Tabla 4-19 Valores promedios alcanzados por las muestras elaboradas con las tres sustituciones al 20% de Cemento portland. Fuente: Propia.

Espécimen	Resistencia a la Compresión a los 28 días de curado (MPa)	Índice de Actividad Hidráulica
CPC	25.13	N. A
G600	17.58	69.93 %
G700	18.18	72.32 %
G800	18.73	74.51 %

La norma establece un mínimo de Índice de Actividad Hidráulica del 75 %, ninguna de las muestras alcanzó a superar este límite, aunque la ceniza tratada a 800 °C es la que se encuentra más cercana a la especificación de la norma NMX-C-273-ONNCCE, para poder hacer uso de la ceniza como sustituto de Cemento portland, por lo que es posible considerar que estos valores alcanzados son relativos a la cantidad de sustitución que se logra alcanzar en otras cenizas provenientes de la biomasa.

Una variedad de estudios han determinado la resistencia a la compresión de pastas cementantes adicionadas con diferentes porcentajes de sustitución de cenizas provenientes de biomasa de características diferentes (Aprianti et al., 2015; Guilherme Chagas Cordeiro & Sales, 2015; Madurwar et al., 2013; Nakanishi et al., 2014; Rodier et al., 2017; Zhou et al., 2012), estos estudios alcanzaron porcentajes de Actividad Hidráulica similares por lo que algunos autores proponen tratar las cenizas con diferentes métodos de activación tanto mecánica como química para superar el límite establecido del 75% (Bahurudeen & Santhanam, 2015; G C Cordeiro, Tavares, & Toledo Filho, 2016; G C Cordeiro et al., 2008; Guilherme Chagas Cordeiro & Sales, 2016; Maria C G Juenger & Siddique, 2015; Madurwar et al., 2013). La actividad de los materiales suplementarios cementicios depende de una combinación de propiedades físicas y químicas.

Frías et al., (2017) determinaron la resistencia a la compresión (Figura 4-11) de dos sustituciones al 20% de Cemento en una pasta cementante a 7, 28 y 60 días de curado, las cenizas ensayadas son de caña de azúcar, una procesada industrialmente entre 700 °C – 800 °C, y la otra procesada en laboratorio a 700 °C, similar a nuestro tratamiento, las sustituciones mostraron un comportamiento similar (Figura 4-11 y 4-12), no alcanzaron la

resistencia a la compresión de la muestra testigo, las resistencias se incrementaron con el tiempo de curado pero aún no se alcanzó la resistencia.

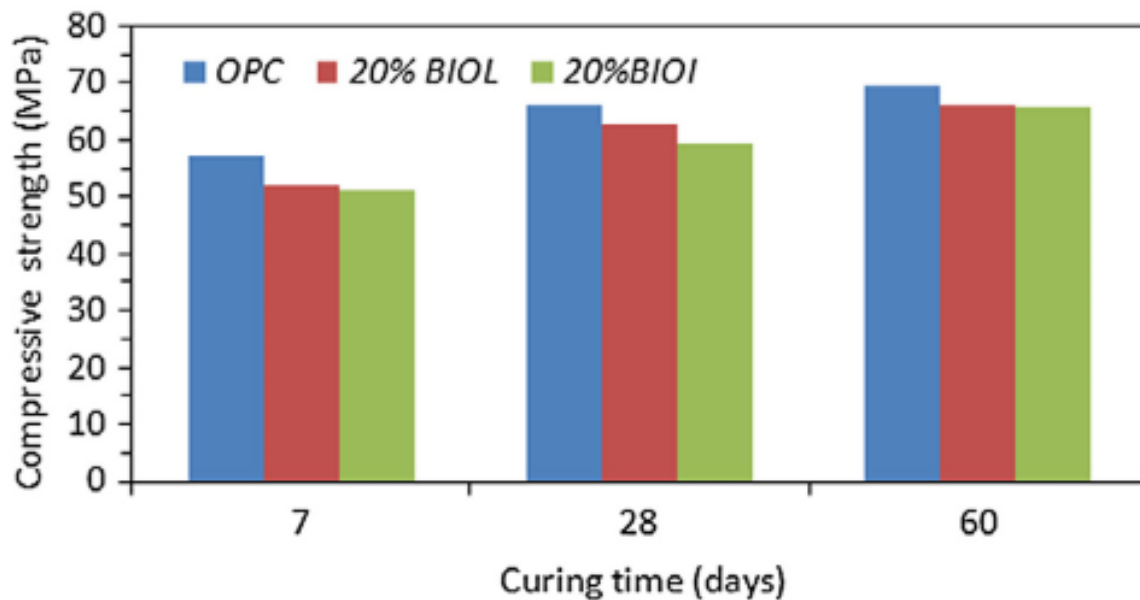


Figura 4-4 Resistencia a la compresión de dos sustituciones al 20% de ceniza de bagazo de caña, curadas a 7, 28 y 60 días. Tomado de: Frías et al., (2017).

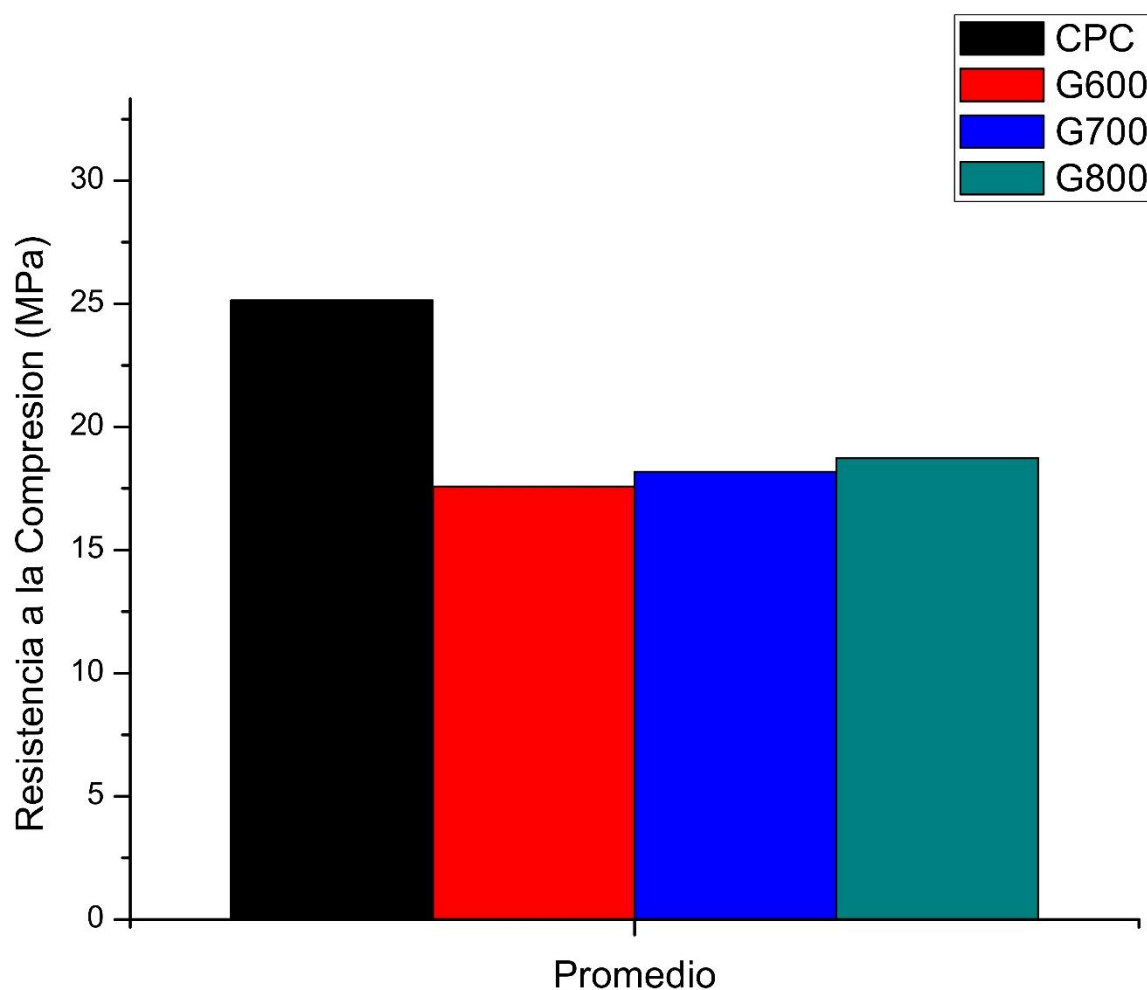


Figura 4-5 Resistencia a la compresión en promedio de los especímenes elaboradas con ceniza de gallinaza y curado a los 28 días.

Este comportamiento mecánico es similar en tendencia a otras puzolanas utilizadas en la preparación de Cementos adicionados (Frías Rojas, Sánchez de Rojas Gómez, & Frías Rojas, 2013; Maria C G Juenger & Siddique, 2015; Sánchez de Rojas Gómez & Frías Rojas, 2013; Stark, 2011).

En cuanto al Índice de Actividad Hidráulica alcanzado por las cenizas tratadas a 600 °C, 700 °C, 800 °C, las podemos contrastar con los valores alcanzados por otras puzolanas, en la Tabla 4-20 se muestran los valores obtenidos por Chindapasirt, Jaturapitakkul, & Sinsiri, (2005) para cenizas volantes sin tratamiento y con tratamiento en el tamaño de la partícula (activación mecánica para alcanzar mejores resistencias) en un 20% y 40% de sustitución del Cemento en peso de la pasta cementante.

Tabla 4-20 Comparación del Índice de Actividad Hidráulica de cenizas volantes y las muestras elaboradas con gallinaza.

Muestra	OFA20	OFA40	CFA20	CFA40	G600	G700	G800
IAH (%)	83.11	72.94	89.30	84.15	69.93	72.32	74.51

De la que podemos deducir que en el estado actual de nuestras cenizas sin tratamiento no se alcanzaran mayores resistencias a mayores porcentajes de sustitución de Cemento portland, la ceniza que mayor Índice de Actividad Hidráulica alcanzó fue la calcinada a 800 °C, por lo que los porcentajes de sustitución para la siguiente etapa deben ser menores al 20%.

El Índice de Actividad Hidráulica

aumenta con la disminución del tamaño de la partícula (G C Cordeiro et al., 2016), G C Cordeiro et al., (2008) realizaron tratamientos durante distintos tiempos en moliendas vibratorias a cenizas de bagazo de caña para disminuir el tamaño de partícula y elaboraron las micrografías presentadas en la Figura 4-13:

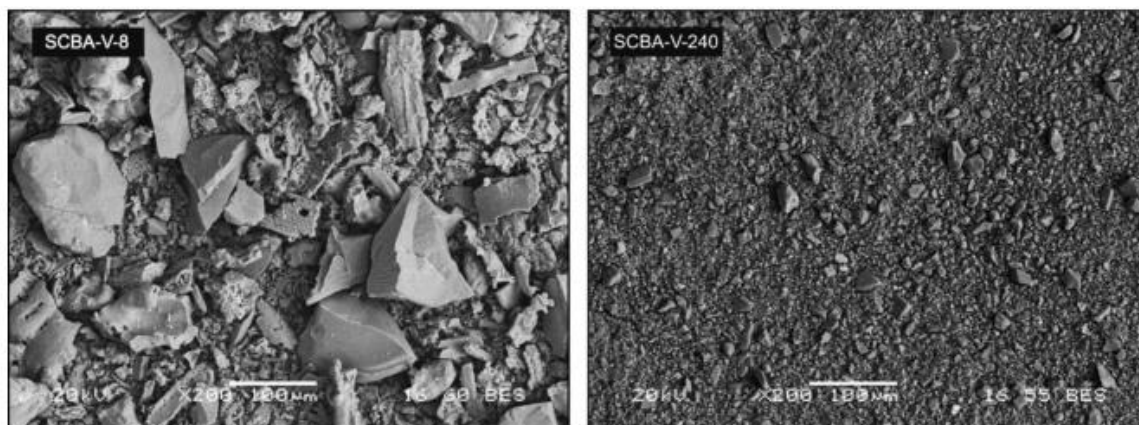


Figura 4-6 Micrografías de las cenizas de bagazo de caña sometidas a molienda durante 8 minutos y 240 minutos respectivamente. Tomada de G C. Cordeiro et al., (2008).

En la Tabla 4-21 se aprecia el incremento del Índice de Actividad Hidráulica con los distintos tamaños de partícula preparados, de acuerdo a Cordeiro como fue citado por Madurwar et al., (2013) una ultra finura de la ceniza, resulta en valores no cuantificables de cambio en el comportamiento mecánico de las mezclas.

Tabla 4-21 Incremento del Índice de Actividad Hidráulica en ceniza de bagazo de caña con distintos tamaños de partícula. Tomado de G C. Cordeiro (2008).

Muestra	SCBA-AR	SCBA-V-8	SCBA-V-15	SCBA-V-30	SCBA-V-60	SCBA-V-120	SCBA-V-240
IAH (%)	49	71	77	79	89	100	103

Bahurudeen & Santhanam, (2015) quemaron, molieron y tamizaron ceniza de bagazo de caña para obtener cenizas, las cuales evaluaron para conocer la actividad puzolánica que produce cada uno de estos métodos por separado y en combinación y así establecer las características que deben cumplirse en el tratamiento para obtener la mejor actividad puzolánica posible.

Tabla 4-22 Cambio del Índice de Actividad Hidráulica resultado del incremento de la temperatura.

Índice de Actividad Hidráulica encontrado por Bahurudeen & Santhanam, (2015) en cenizas de bagazo de caña					
Muestra	Raw BA	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
IAH	73	74	86	77	67
Índice de Actividad Hidráulica encontrado por (Guilherme Chagas Cordeiro & Sales, 2016) en cenizas de pasto elefante					
Muestra	EGA500	EGA600	EGA700	EGA800	EGA900
IAH	93	108	98	94	95

La Tabla 4-22 muestra que a mayor temperatura de calcinación se incrementa el Índice de Actividad Hidráulica, de la misma forma en que la gallinaza se comportó, pero existe un límite en la reactividad alcanzada por las cenizas tratadas, en el caso del bagazo de caña a 700°C se alcanzó la mayor resistencia, el pasto elefante a 600°C y en la gallinaza sucedió a 800°C, entre las causas que lo provocan se encuentra el cambio de las fases amorfas de los componentes químicos a fases cristalinas menos reactivas (Bahurudeen & Santhanam, 2015), en el caso de la gallinaza a 800 °C el principal componente, la calcita, se descompone y da paso a la cal, como fue descrito anteriormente en el análisis de la Difracción de rayos X, esta última nos da mayor reactividad cementicia.

Los inquemados es otro parámetro que se modifica con el incremento de la temperatura, en la ceniza de bagazo de caña, anteriormente mencionada, se reduce la gran presencia de

inquemados (del orden del 21%), con el incremento de la temperatura, dándonos los beneficios mencionados en las propiedades reológicas para la gallinaza, pero como se deduce debemos encontrar un equilibrio entre el incremento de la temperatura y las propiedades desarrolladas por cada una de las cenizas producidas según diversos métodos aceptados.

La morfología de las cenizas de bagazo de caña, también estudiada en el trabajo de Bahurudeen & Santhanam, (2015), nos da información sobre las causas por las que se incrementa la resistencia con la temperatura, en este caso las formas van desde prismática, esférica, irregular y fibrosa, estas últimas pertenecen a los inquemados (21%) mencionados anteriormente, las formas fibrosas deterioran la resistencia final, a mayor área superficial específica menor es la resistencia, a diferencia de la gallinaza, la tendencia de las formas de las partículas de las cenizas van de lo irregular a formas esféricas, relacionado a la disminución del área superficial específica por lo tanto un posible incremento en la reactividad. El pasto elefante estudiado por Guilherme Chagas Cordeiro & Sales, (2016), ante el aumento de la temperatura reduce el área superficial específica atribuida a la volatilización del carbono, morfológicamente la ceniza presenta partículas fibrosas y celulares con gran área superficial específica y gran cantidad de poros, como se menciona anteriormente, ante el incremento de la temperatura se reduce el área superficial específica.

El resultado alcanzado en la primera parte de los resultados es que la ceniza calcinada a 800 °C presenta mejores características químicas y físicas que los otros dos tratamientos térmicos.

Etapa 2: Determinación del porcentaje de sustitución con mayor desarrollo de la resistencia a la compresión de la pasta cementante.

La ceniza producida a 800 °C fue utilizada para sustituir el Cemento en una pasta cementante en tres diferentes porcentajes de sustitución 10%, 15% y 20%. Las mezclas fueron preparadas según lo expuesto en la Tabla 4.23, utilizando Cemento, arena graduada, ceniza y agua descritas en la metodología. Se elaboraron 6 especímenes para cada sustitución y cada tiempo de curado haciendo un total de 72 cubos fueron elaborados según recomendaciones de la NMX-C-273-ONNCCE.

Tabla 4-23 Dosificación de los materiales utilizados para la elaboración de los especímenes con diferentes porcentajes de sustitución. Fuente: Propia.

Espécimen	Cemento (g)	Arena (g)	Ceniza (g)	Agua (g)	a/c
CPC	500	1375	0	387.5	0.775
G800-10	450	1375	50	387.5	0.775
G800-15	425	1375	75	387.5	0.775
G800-20	400	1375	100	387.5	0.775

La primera familia fue puesta a prueba a 7 días de curado en la máquina universal. Los resultados son mostrados en la Figura 4-14, de los cuales, el 10% de sustitución estimó 21.52 MPa, siendo este resultado el mayor entre todos los demás porcentajes de sustitución 15%, 20%, incluso mayor que el espécimen control.

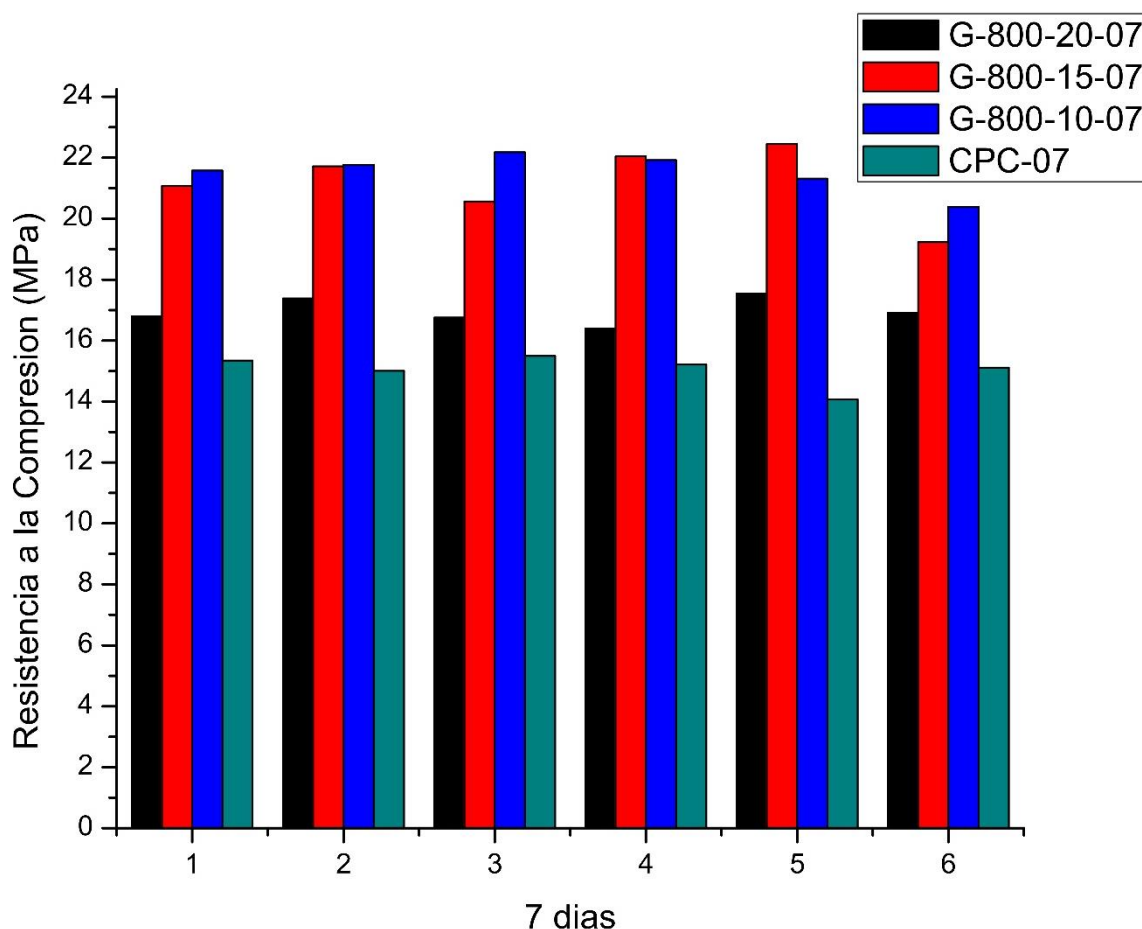


Figura 4-7 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC-07, G-800-10-07, G-800-15-07, G-800-20-07. Fuente: Propia

El Índice de Actividad Hidráulica para el 10% de sustitución es de 143% como se muestra en la Tabla 4-24, esto indica una mayor resistencia inicial superando a la mezcla control de Cemento portland compuesto.

Tabla 4-24 Índice de Actividad Hidráulica de las muestras elaboradas CPC-07, G-800-10-07, G-800-15-07, G-800-20-07. Fuente: Propia.

Muestra	G-800-20-07	G-800-15-07	G-800-10-07	CPC-07
IAH	112.813407	140.847489	143.116734	100

Cabe resaltar los resultados obtenidos por los otros porcentajes de sustitución, siendo estos mayores al 100%, lo que demuestra la reactividad puzolánica inicial debido a la presencia de CaO y la acidez de la ceniza, el contenido de K₂O acelera las reacciones puzolánicas debido al incremento en el Ph de la solución de poro generada durante la hidratación. Aunque

el alto contenido de K₂O puede llegar a ser una limitación debido a la posible disminución de la durabilidad del concreto por la oxidación que llega a causar a largo plazo como es sugerido por Guilherme Chagas Cordeiro & Sales, (2016).

La segunda familia fue probada a los 28 días de curado, la resistencia a la compresión cae hasta llegar a ser menor que la desarrollada por el espécimen control, esto se hace notable en la sustitución del 20%, la particularidad de la sustitución al 10% es que la resistencia a la compresión es muy cercana a la del espécimen control (Figura 4-15).

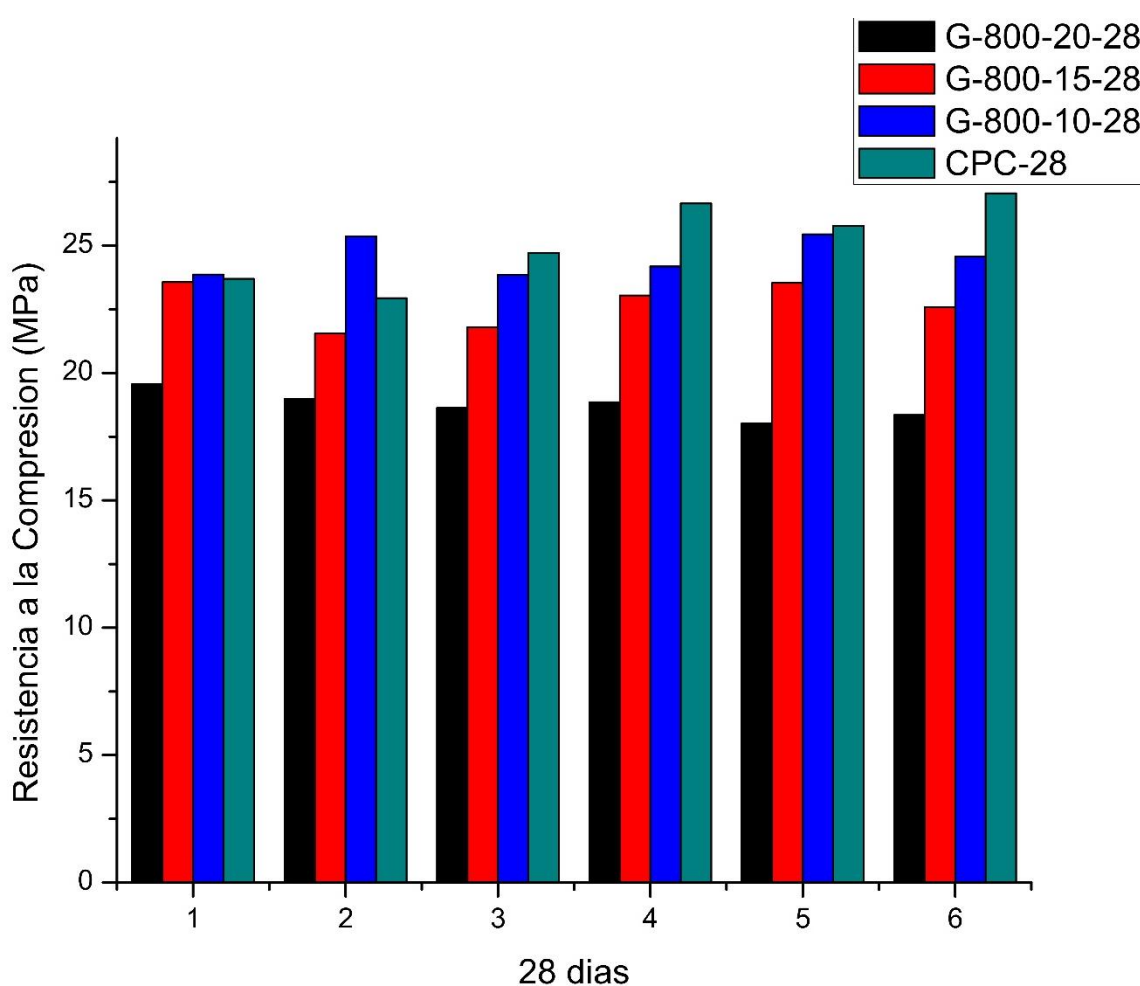


Figura 4-8 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC-28, G-800-10-28, G-800-15-28, G-800-20-28. Fuente: Propia

El Índice de Actividad hidráulica para los 28 días de curado se muestran en la Tabla 4-25, es aún mas notoria la cercanía de la sustitución del 10% de Cemento portland compuesto por ceniza de gallinaza tratada a 800 °C.

Tabla 4-25 Índice de Actividad Hidráulica de las muestras elaboradas CPC-28, G-800-10-28, G-800-15-28, G-800-20-28. Fuente: Propia.

Muestra	G-800-20-28	G-800-15-28	G-800-10-28	CPC-28
IAH	74.5139729	90.2079351	97.6378106	100

La tercera familia, 90 días de curado, se muestra en la Figura 4-16, una nueva etapa en la reacción puzolánica se hace presente en los resultados obtenidos en la prueba de compresión axial, ya que nuevamente todos los porcentajes de sustitución superan al desarrollado por la muestra control.

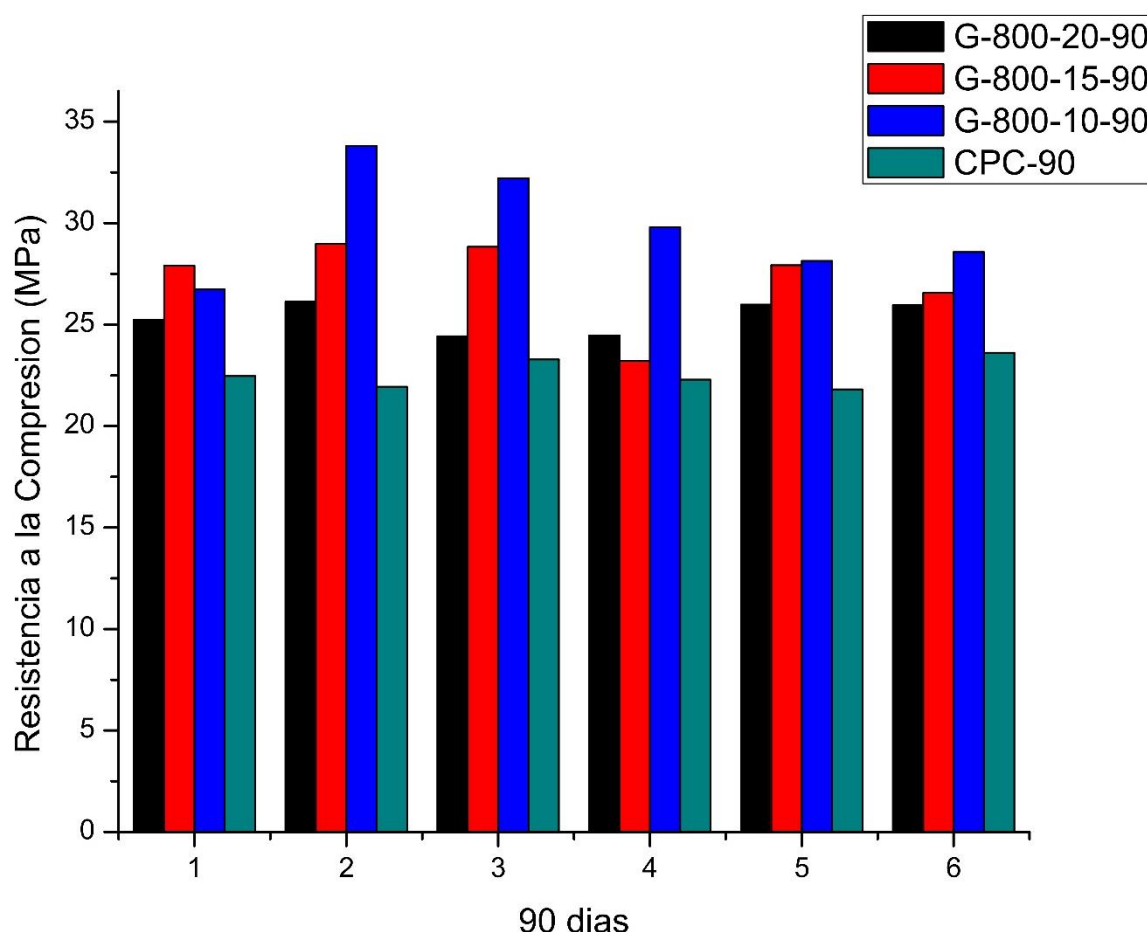


Figura 4-9 Resistencia a la compresión de las muestras elaboradas CPC-90, G-800-10-90, G-800-15-90, G-800-20-90. Fuente: Propia

Los valores obtenidos del Índice de Actividad Hidráulica sacan a relucir que las tres cenizas superan el 100%, prueba de la reactividad puzolánica presente en sus componentes químicos y físicos, se presenta en la Tabla 4-26, los valores para cada conjunto de especímenes evaluados.

Tabla 4-26 Índice de Actividad Hidráulica de las muestras elaboradas CPC-90, G-800-10-90, G-800-15-90, G-800-20-90. Fuente: Propia

Muestra	G-800-20-90	G-800-15-90	G-800-10-90	CPC-90
IAH	112.422495	120.713334	132.40569	100

La ceniza de gallinaza tratada térmicamente a 800 °C muestra un comportamiento puzolánico visto en otras cenizas catalogadas como puzolanas.

Rodier et al., (2017) estudiaron la actividad puzolánica de las cenizas de bambú, contrastada con la actividad de la ceniza de bagazo de caña, una muestra testigo, una puzolana natural y la combinación de dos distintas cenizas para reemplazar parcialmente el Cemento dentro de una pasta cementante, en la Figura 4-17 se aprecia que las muestras se curaron a 7, 28 y 90 días. Ante el incremento del tiempo de curado se incrementa la resistencia por la formación de C-S-H debido a la hidratación del Cemento y la reactividad puzolánica de las distintas sustituciones.

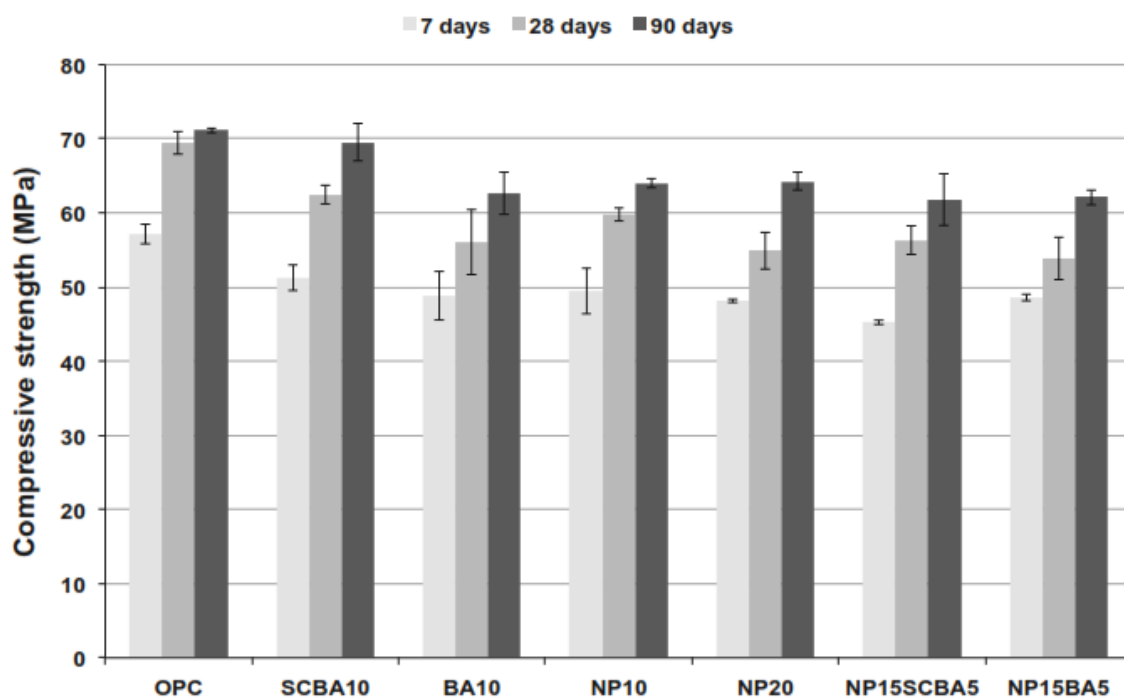


Figura 4-10 Resistencia a la compresión de las cenizas de bambú, contrastada con la actividad de la ceniza de bagazo de caña, una muestra testigo, una puzolana natural y la combinación de dos de ellas a diferentes edades de curado. Tomado de: Rodier et al., (2017).

Es importante hacer referencia a que los porcentajes de sustitución, por las diversas cenizas, provocan menores resultados en la resistencia a la compresión que la desarrollada por la muestra testigo (OPC). La ceniza de gallinaza presenta una tendencia diferente a las referidas, su mejor característica es el superior desarrollo de resistencia a edades tardías de curado (<90 días) (Figura 18).

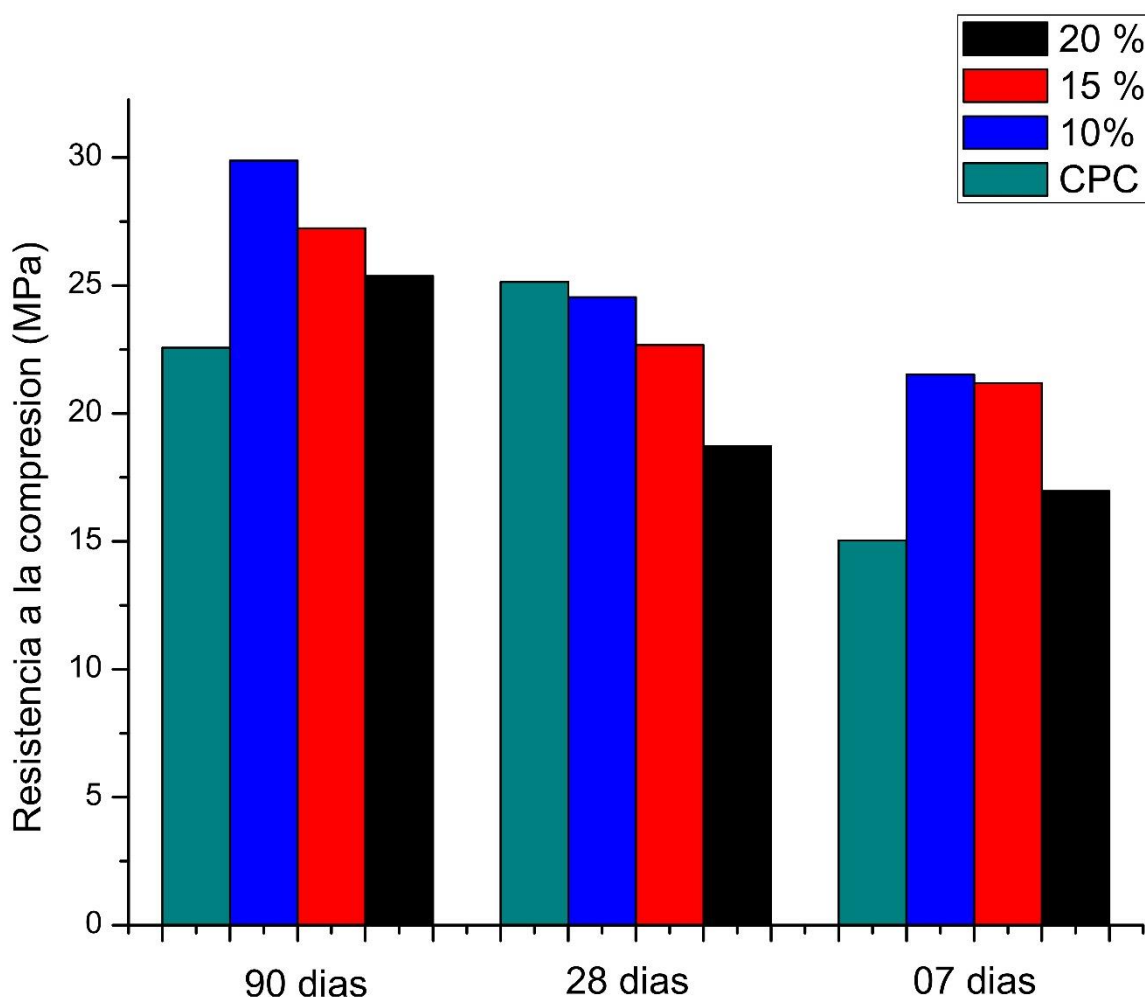


Figura 4-11 Resistencia a la compresión promedio de cada porcentaje de sustitución así como la muestra testigo, reflejo de la tendencia al incremento de la temperatura.

Una comparativa de los Índices de Actividad Hidráulica alcanzados por ceniza volante sin tratamiento y con tratamiento (Chindaprasirt et al., 2005) frente a los resultados obtenidos para la gallinaza calcinada a 800 °C en sus distintos porcentajes de sustitución y se muestran en la Tabla 4-27:

Tabla 4-27 comparativa de los Índices de Actividad Hidráulica alcanzados por ceniza volante sin tratamiento y con tratamiento frente a los resultados obtenidos para la gallinaza. Tomado de Chindaprasirt et al., (2005)

Muestra	IAH (7 días)	IAH (28 días)	IAH (90 días)
OFA20	74.22	83.12	87.85
OFA40	50.25	72.94	72.41

CFA 20	77.50	89.30	95.99
CFA 40	72.41	84.15	92.57
G-800-10	143.09	97.61	132.45
G-800-15	140.82	90.18	120.74
G-800-20	112.77	74.50	112.46

En la Figura 4-19 se aprecia fácilmente como la gallinaza en estudio presenta mejores resultados en cuanto al Índice de Actividad Hidráulica.

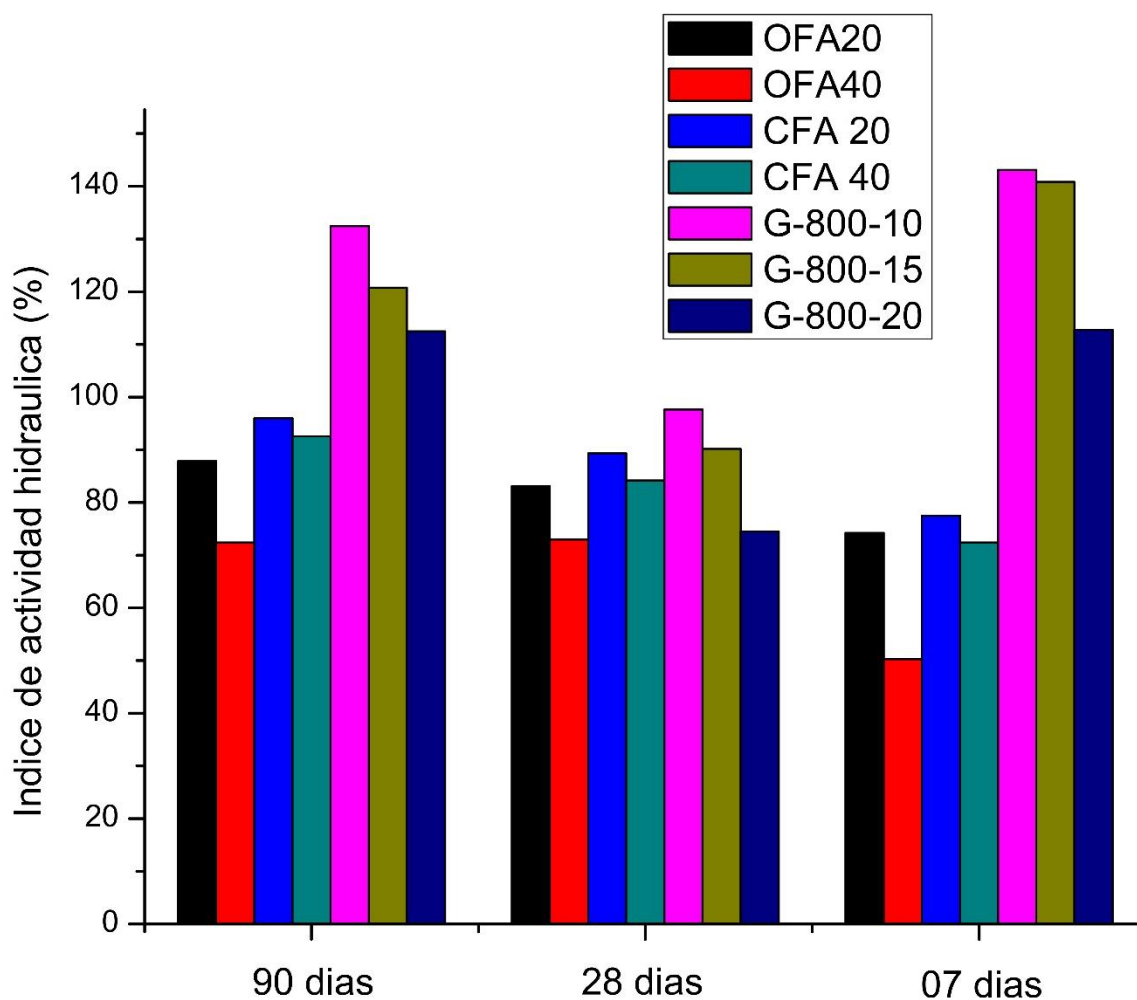


Figura 4-12 Índice de Actividad Hidráulica alcanzado por diferentes sustituciones de Cemento portland, resaltando los altos valores para la ceniza de gallinaza obtenida a 800 °C de calcinación en un 10 % de sustitución y para cualquier edad de curado. Fuente: Propia

El comportamiento de los resultados demuestra que la gallinaza calcinada a 800 °C presenta alta actividad puzolánica, sustituye hasta un 20% al Cemento presentando mejores propiedades físicas y mecánicas que un Cemento portland compuesto en pastas cementantes curadas a 7, 28 y 90 días.

Conclusiones

- La gallinaza estudiada resultó semejante a lo publicado en la literatura citada, características como composición química (CaO, P₂O₅, SiO₂, K₂O), cristalográfica (Calcita, Cuarzo, Silvita), morfología (La forma irregular de las partículas se va perdiendo, al incremento de la temperatura las partículas tienden a formarse en esferas) y tamaño de partícula son semejantes.
- El Análisis Termo Gravimétrico identificó la zona de cambio a fases inorgánicas entre 600°C y 800°C.
- La composición química determinada mediante Fluorescencia de rayos X y la composición cristalográfica determinada mediante Difracción de rayos X permitió la clasificación de las cenizas de gallinaza como cenizas de biomasa tipo CK.
- El Índice de Actividad Hidráulica, la composición química y cristalográfica que mejor actividad puzolánica presenta es la ceniza de gallinaza tratada a 800 °C.
- La composición química nos muestra una gran cantidad de Oxido de Calcio 52%, fósforo < 12% y Sílice < 12% principalmente.
- La composición cristalográfica muestra presencia de Cal, Silvita y Alúmina.
- La ceniza de gallinaza sustituye hasta un 20% al Cemento portland compuesto presentando Índices de Actividad Hidráulica a 7, 28 y 90 días, mayores al 100% (112%, 74%, 112% respectivamente).

Recomendaciones

1. Realizar estudios complementarios a la ceniza de gallinaza: Micrografías electrónica de barrido y barrido con energía dispersiva de rayos X, con la finalidad de complementar la caracterización de la ceniza particularmente utilizada en este estudio.
2. Estudios sobre el tamaño de partícula, ya que posiblemente el incremento de área superficial específica active la puzolanidad de las cenizas.
3. Es importante conocer otros aspectos reológicos de las pastas como tiempos de fraguado inicial.
4. Estudiar las posibilidades de interacción de la ceniza de gallinaza en concretos.

Referencias Bibliográficas

- Acharya, B., Dutta, A., Mahmud, S., Tushar, M., & Leon, M. (2014). Ash Analysis of Poultry Litter, Willow and Oats for Combustion in Boilers. *Journal of Biomass to Biofuel*, 1, 16–26. <https://doi.org/10.11159/jbb.2014.003>
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.003>
- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252–2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review. *Construction and Building Materials*, 74, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>
- Armstrong, T. (2013). An overview of global cement sector trends. Insights from the Global Cement Report 10th Edition. In *XXX Technical Congress FICEM-APCAC* (pp. 2–26). Retrieved from <http://www.cemnet.com>
- Askeland, D. R., & Phulé, P. P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (I. T. Editores, Ed.) (4a.).
- Bahurudeen, A., & Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 56, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.002>
- Billen, P., Costa, J., Van Der Aa, L., Van Caneghem, J., & Vandecasteele, C. (2015). Electricity from poultry manure: A cleaner alternative to direct land application. *Journal of Cleaner Production*, 96, 467–475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.016>
- BOLAN, N. S., SZOGI, A. A., CHUASAVATHI, T., SESHADRI, B., ROTHROCK, M. J., & PANNEERSELVAM, P. (2010). Uses and management of poultry litter. *World's*

- Poultry Science Journal*, 66(04), 673–698.
<https://doi.org/10.1017/S0043933910000656>
- CCA. (2014). La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas, 6. Retrieved from <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11405-la-quema-de-residuos-agr-colas-es-una-fuente-de-dioxinas-es.pdf>
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 425–428. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.003>
- Cimò, G., Kucerik, J., Berns, A. E., Schaumann, G. E., Alonzo, G., & Conte, P. (2014). Effect of Heating Time and Temperature on the Chemical Characteristics of Biochar from Poultry Manure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(8), 1912–1918. <https://doi.org/10.1021/jf405549z>
- Cordeiro, G. C., & Sales, C. P. (2015). Pozzolanic activity of elephant grass ash and its influence on the mechanical properties of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.019>
- Cordeiro, G. C., & Sales, C. P. (2016). Influence of calcining temperature on the pozzolanic characteristics of elephant grass ash. *Cement and Concrete Composites*, 73, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.008>
- Cordeiro, G. C., Tavares, L. M., & Toledo Filho, R. D. (2016). Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. *Cement and Concrete Research*, 89, 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- Cotana, F., Coccia, V., Petrozzi, A., Cavalaglio, G., Gelosia, M., & Merico, M. C. (2014). Energy valorization of poultry manure in a thermal power plant: Experimental

- campaign. In *Energy Procedia* (Vol. 45, pp. 315–322). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.034>
- Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-Ray Diffraction*. ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, Inc. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Czarnecki, L., Hager, I., & Tracz, T. (2015). Material Problems in Civil Engineering: Ideas-Driving Forces-Research Arena. *Procedia Engineering*, 108, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.110>
- Damineli, B. L., Pileggi, R. G., & John, V. M. (2013). 2 - Lower binder intensity eco-efficient concretes. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 26–44). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9780857098993.1.26>
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- Donatello, S., Tyrer, M., & Cheeseman, C. R. (2010). Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>
- FAO. (2013a). *POULTRY DEVELOPMENT REVIEW*.
- FAO. (2013b). *Revisión del Desarrollo Avícola. Revisión del desarrollo avícola*.
- Flatt, R. J., Roussel, N., & Cheeseman, C. R. (2012). Concrete: An eco material that needs to be improved. *Journal of the European Ceramic Society*, 32(11), 2787–2798. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.012>
- Font-Palma, C. (2012). Characterisation, kinetics and modelling of gasification of poultry manure and litter: An overview. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.08.017>
- Frías, M., Rodríguez, O., Sanchez de Rojas, M. I., Villar-Cociña, E., Rodrigues, M. S., & Savastano Junior, H. (2017). Advances on the development of ternary cements

- elaborated with biomass ashes coming from different activation process. *Construction and Building Materials*, 136, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.018>
- Frias Rojas, M., Sánchez de Rojas Gómez, M. I., & Frías Rojas, M. (2013). Artificial pozzolans in eco-efficient concrete. In *Eco-Efficient Concrete* (pp. 105–122). <https://doi.org/10.1533/9780857098993.2.105>
- Fry, M. (2013). Cement, carbon dioxide, and the “necessity” narrative: A case study of Mexico. *Geoforum*, 49, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.06.003>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO2 emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012>
- Giraldo, M. A., & Tobón, J. I. (2006). Evolución Mineralógica del Cemento Portland Durante el Proceso de Hidratación. *Dyna*, 73(148), 69–81.
- Habert, G. (2013). 1 - Environmental impact of Portland cement production. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 3–25). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9780857098993.1.3>
- Hernández Trujillo, J. M., & Padilla Herrera, R. (2015). Evolución reciente de la producción y consumo de huevo en México. *CIECAS-IPN*, 21(37), 75–87. Retrieved from <http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/10462/1/REXTN-07-Hernandez.pdf>
- Hunger, S., Sims, J. T., & Sparks, D. L. (2008). Evidence for struvite in poultry litter: effect of storage and drying. *Journal of Environmental Quality*, 37(4), 1617–1625. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0331>

- Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>
- Juenger, M. C. G., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>
- Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041–4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
- Kaneko, K., Li, L., Shimizu, T., Matsumura, H., & Takarada, T. (2014). Fuel Gas Production and Plant Nutrient Recovery from Digested Poultry Manure. *Japan Poultry Science Association*, 51, 444–450. <https://doi.org/https://doi.org/10.2141/jpsa.0130184>
- Keener, K. M. (2002). Characterization of Poultry Manure for Potential Co- Combustion with Coal in an Electricity Generation Plant, 0300(02).
- Kelleher, B. ., Leahy, J. ., Henihan, A. ., O’Dwyer, T. ., Sutton, D., & Leahy, M. . (2002). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 27–36. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X)
- Kim, S.-S., & Agblevor, F. A. (2007). Pyrolysis characteristics and kinetics of chicken litter. *Waste Management*, 27(1), 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.012>
- Komiyama, T., Kobayashi, A., & Yahagi, M. (2013). The chemical characteristics of ashes from cattle, swine and poultry manure. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15(1), 106–110. <https://doi.org/10.1007/s10163-012-0089-2>
- Kongsomart, B., Li, L., & Takarada, T. (2015). Preparation of Activated Carbons From Teak

- Sawdust Using Chicken Dropping Compost and Empty Fruit Bunch. *International Journal of Biomass & Renewables*, 4(2), 1–7.
- Leeuw, G. De. (2016). Successful thermal conversion of poultry litter in The Netherlands Dutch poultry litter market, 1–11.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Low-calcium, P. I., & Papadakis, V. G. (1999). Effect of fly ash on Portland cement systems, 29, 1727–1736.
- Lynch, D., Henihan, A. M., Kwapinski, W., Zhang, L., & Leahy, J. J. (2013). Ash Agglomeration and Deposition during Combustion of Poultry Litter in a Bubbling Fluidized-Bed Combustor. *Energy & Fuels*, 27(8), 4684–4694. <https://doi.org/10.1021/ef400744u>
- Madurwar, M. V, Ralegaonkar, R. V, & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>
- Marinković, S. B. (2013). 3 - Life cycle assessment (LCA) aspects of concrete. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (pp. 45–80). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9780857098993.1.45>
- Martínez, G. G. P., & Becerra, R. A. (1988). *Atlas de ubicación de productos agropecuarios utilizables en la planificación y desarrollo de la acuicultura en México*. Secretaría de Pesca, Dirección General de Acuicultura.
- Martínez Reyes, J. (2007). “*CARACTERIZACIÓN DE LA REACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES DE ORIGEN NATURAL, INDUSTRIAL Y DESPERDICIO AGRÍCOLA.*” INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.
- Metha, K., & Monteiro, P. (1998). Estructura, propiedades y materiales. *IMCYT*, 209–220.

- Nakanishi, E. Y., Frías, M., Martínez-Ramírez, S., Santos, S. F., Rodrigues, M. S., Rodríguez, O., & Savastano, H. (2014). Characterization and properties of elephant grass ashes as supplementary cementing material in pozzolan/Ca(OH)₂ pastes. *Construction and Building Materials*, 73, 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.078>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *Concrete technology*.
- Niu, Y., Tan, H., Wang, X., Liu, Z., Liu, H., Liu, Y., & Xu, T. (2010). Study on fusion characteristics of biomass ash. *Bioresource Technology*, 101(23), 9373–9381. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.144>
- Parhizkar, T., Najimi, M., & Pourkhorshidi, A. R. (2010). Proposing a New Approach for Qualification of Natural Pozzolans. *Transaction A: Civil Engineering*, 17(6), 450–456.
- Pontes, J., Silva, A. S., & Faria, P. (2013). Evaluation of pozzolanic reactivity of artificial pozzolans. *Materials Science Forum*, 730–732, 433–438. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.730-732.433>
- Pourkhorshidi, A. R. (2013). 6 - Tests to evaluate pozzolanic activity in eco-efficient concrete. In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (Vol. 1, pp. 123–137). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9780857098993.2.123>
- Rodier, L., Bilba, K., Onésippe, C., & Arsène, M.-A. (2017). Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. *Materials and Structures*, 50(1), 87. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0958-6>
- Sabir, B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Sánchez de Rojas Gómez, M. I., & Frías Rojas, M. (2013). 4 – Natural pozzolans in eco-efficient concrete. In *Eco-Efficient Concrete* (pp. 83–104). <https://doi.org/10.1533/9780857098993.2.83>

- Sandoval, F. G. (2012). *Manual de supervisión de obras de concreto*. (Limusa, Ed.) (2a ed.). México: Limusa.
- Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.003>
- Sato, K., Suemune, S., Nitta, K., Nakayama, C., Inokuma, S., Tonooka, S., ... Takarada, T. (2013). A simple fabrication route of activated carbons from chicken droppings. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 86–89. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.008>
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>
- Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.025>
- Scrivener, K. L., & Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>
- Skoog, D. A., Holler, J. F., & Crouch, S. R. (2008). *Principios de análisis instrumental*. CENGAGE Learning (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Stark, J. (2011). Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 666–678. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.028>
- Thomas, J. J., Biernacki, J. J., Bullard, J. W., Bishnoi, S., Dolado, J. S., Scherer, G. W., & Luttge, A. (2011). Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. *Cement and Concrete Research*. Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.10.004>

Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2013). Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>

Tsimas, S., & Moutsatsou-Tsima, A. (2005). High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: Problems, solutions and perspectives. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.012>

Van Grieken, R. E., & Markowicz, A. A. (2002). *Handbook of X-ray Spectrometry 2nd Edition, Revised and Expanded. Ch4. Spectrum Evaluation, Marcell Dekker.*

Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>

Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash.: Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel*, 105, 19–39. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001>

Vassilev, S. V, Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., & Morgan, T. J. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, 94, 1–33. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.030>

Vassilev, S. V, Baxter, D., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and . matter. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.043>

Vassilev, S. V, Baxter, D., & Vassileva, C. G. (2014). An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types. *Fuel*, 117(PART A), 152–183. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.024>

- Wilson, L., Yang, W., Blasiak, W., John, G. R., & Mhilu, C. F. (2011). Thermal characterization of tropical biomass feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.058>
- Zain, M. F. M., Islam, M. N., Mahmud, F., & Jamil, M. (2011). Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 25(2), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.003>
- Zhang, M. H., Lastra, R., & Malhotra, V. M. (1996). Rice-husk ash paste and concrete: Some aspects of hydration and the microstructure of the interfacial zone between the aggregate and paste. *Cement and Concrete Research*, 26(6), 963–977. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00061-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00061-0)
- Zhou, S., Zhang, X., & Chen, X. (2012). Pozzolanic activity of feedlot biomass (cattle manure) ash. *Construction and Building Materials*, 28(1), 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.003>

Anexos

Anexo A Selección de la relación a/c

Se realizó el procedimiento para obtener la resistencia a la compresión a los 28 días de curado para cada probeta a diferentes relaciones a/c como se indica en la Tabla 3-3.

Tabla Anexo A-1 Proporciones para pasta cementante testigo con diferentes relaciones a/c

Material	Cantidad
<i>Cemento portland compuesto (CPC 30R)</i>	500 g
<i>Arena graduada</i>	1 375 g
<i>Agua</i>	312.50, 362.50, 387.50 y 412.5

Los resultados obtenidos en la máquina de ensaye universal a la compresión fueron los mostrados en la Tabla 3-4.

Tabla Anexo A-2 Resistencia a la compresión de pastas cementantes con diferentes relaciones a/c

Relación a/c	Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	Fluidez (cm)
0.625	145.09 MPa	>25
0.725	176.03 MPa	22
0.775	173.16 MPa	19
0.825	188.68 MPa	16

Se seleccionó la relación a/c 0.775 cumpliendo con la fluidez recomendada por lo que se tomó como el utilizado en todas las proporciones para elaborar las distintas probetas utilizadas en la prueba a la compresión axial

Anexo B Caracterización de la arena

Granulometría

En la Tabla Anexo B-1, se presentan los valores máximos y mínimos aceptados por la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 para las arenas utilizadas en la determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.

Tabla Anexo B-1 Clasificación de arena según NMX-C-061-ONNCCE-2001

<i>Arena</i>	0.610
<i>Criba</i> (#)	% retenido
100	98±2
50	75±5
40	30±5
30	2±5
16	0±0

Para cada familia de edad se llevó acabo el análisis granulométrico de las arenas utilizadas en la elaboración de las muestras cúbicas para los ensayos de resistencia a la compresión con sustitución del Cemento.

Tabla Anexo B-2 Pesos Arena Retenida Acumulada Arena 7 días

Arena 7 días

<i>Arena</i>	0.610	
<i>Criba</i> (#)	% retenido	Peso (Kg)
100	100.000	0.6100
50	75.410	0.4600
40	29.508	0.1800
30	0.000	0.0000
16	0.000	0.0000

<i>Tara</i>	0.000	0.0000
-------------	-------	--------

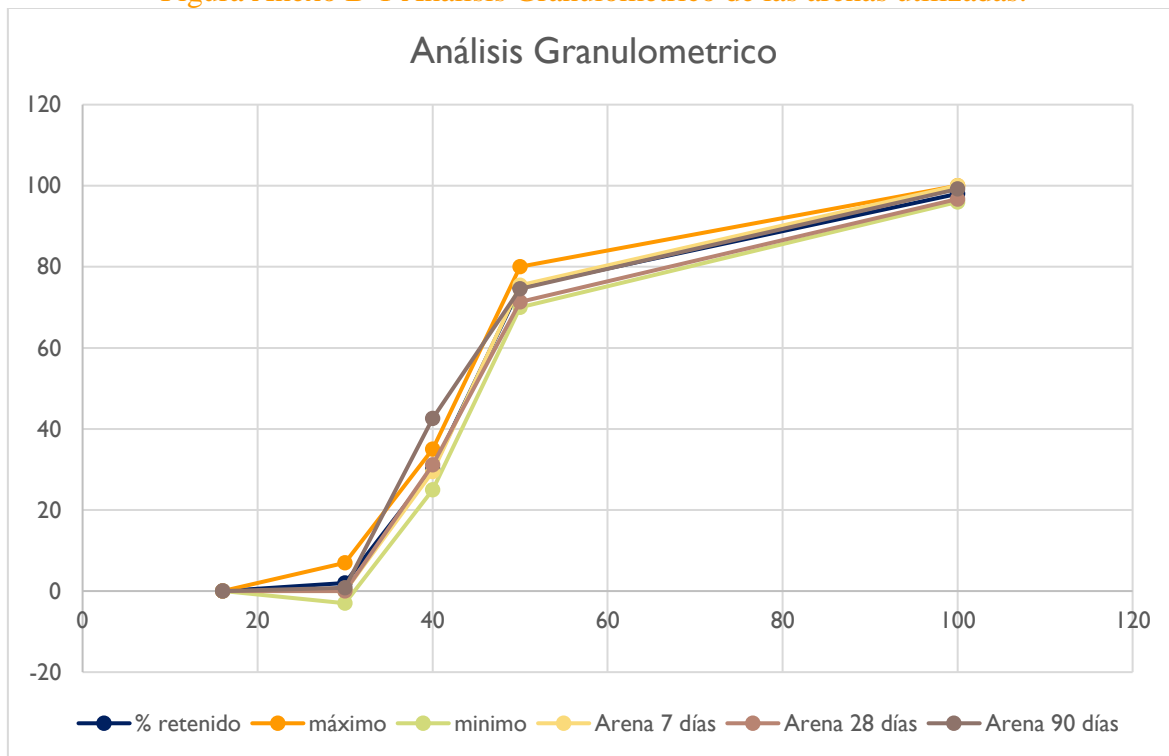
Tabla Anexo B-3 Pesos Arena Retenida Acumulada Arena 28 días
Arena 28 días

<i>Arena</i>	0.690	
<i>Criba (#)</i>	% retenido	Peso (Kg)
100	96.721	0.590
50	71.311	0.435
40	31.148	0.190
30	0.000	0.000
16	0.000	0.000
<i>Tara</i>	16.393	0.100

Tabla Anexo B-4 Pesos Arena Retenida Acumulada Arena 90 días
Arena 90 días

<i>Arena</i>	0.695	
<i>Criba (#)</i>	% retenido	Peso (Kg)
100	99.180	0.605
50	74.590	0.455
40	42.623	0.260
30	0.820	0.005
16	0.000	0.000
<i>Tara</i>	14.754	0.090

Figura Anexo B-1 Análisis Granulométrico de las arenas utilizadas.



Todas las arenas utilizadas en las probetas se encuentran dentro de los parámetros requeridos por la normativa para homogeneizar los resultados.

Gravedad específica y absorción de agregado fino, ASTM C 128

Tabla Anexo B-5 Densidad Relativa Agregado Fino Suelto Húmedo

Muestra	Sustitución	Densidad Relativa (SH)
M1	$\frac{450g}{(1275g + 500g - 1590g)}$	2.43
M2	$\frac{450g}{(1290g + 500g - 1585g)}$	2.20

Tabla Anexo B-6 Densidad Relativa Agregado Fino Suelto Húmedo

Muestra	Sustitución	Densidad Relativa (SSS)
M1	$\frac{500g}{(1270g + 500g - 1585g)}$	2.70

<i>M2</i>	$\frac{500g}{(1290g + 500g - 1590g)}$	2.50
-----------	---------------------------------------	------

Tabla Anexo B-7 Densidad Relativa Agregado Fino Suelto Húmedo

<i>Muestra</i>	Sustitución	% de Absorción
<i>M1</i>	$\left[\frac{500g - 486g}{486g} \right] x 100$	2.88
<i>M2</i>	$\left[\frac{500g - 485g}{485g} \right] x 100$	3.09

<i>Peso volumétrico agregado fino</i>

Peso volumétrico Suelto

Molde = 3.230 kg

Molde + agregado = 11.560 kg

Molde + agregado = 11.580 kg

Pvs = peso volumétrico suelto

Gs = masa del agregado más recipiente

T = masa del recipiente

V = volumen del recipiente

$$Pvs = \frac{Gs - T}{V}$$

$$Pvs = \frac{11.570 - 3.230}{0.00504} = 1654.761 \text{ kg/m}^3$$

Peso volumétrico Varillado

Molde = 3.230 kg

Molde + agregado = 12.330 kg

Molde + agregado = 12.325 kg

$$Pvs = \frac{Gs - T}{V}$$

$$Pvs = \frac{12.327 - 3.230}{0.00504} = 1805.059 \text{ kg/m}^3$$

Anexo C Resistencia a la Compresión

Etapa 1

CPC

Clave	Carga	Resistencia
CPC-1	6041.3	241.650003
CPC-2	5847.8	233.910051
CPC-3	6299.5	251.980034
CPC-4	6795.3	271.810047
CPC-5	6570.3	262.810032
CPC-6	6895.5	275.819979
	6408.25	256.33

G 600

Clave	Carga	Resistencia
G-600-1	4470	178.79
G-600-2	4410	176.54
G-600-3	4620	184.91
G-600-4	4360	174.63
G-600-5	4390	175.7
G-600-6	4620	184.91
	4478.33	179.25

G 700

Clave	Carga	Resistencia
G-700-1	4690	187.51
G-700-2	4830	192.1
G-700-3	4820	192.1
G-700-4	4550	181.82
G-700-5	4680	187.02
G-700-6	4290	171.75
	4643.33	185.38

G-800

Clave	Carga	Resistencia
G-800-1	4990	199.46
G-800-2	4840	193.56
G-800-3	4750	189.97
G-800-4	4810	192.22
G-800-5	4590	183.71
G-800-6	4680	187.09
	4776.67	191.00

Etapa 2**7 días****20 % Sustitución**

	Carga	Resistencia
G-800-1	4280	171.27
G-800-2	4430	177.25
G-800-3	4270	170.85
G-800-4	4180	167.26
G-800-5	4470	178.93
G-800-6	4310	172.47
	4323.33	173.01

15 % Sustitución

	Carga	Resistencia
G-800-1	5370	214.93
G-800-2	5540	221.47
G-800-3	5240	209.73
G-800-4	5620	224.84
G-800-5	5720	228.92
G-800-6	4900	196.09
	5398.33	216.00

10 % Sustitución

	Carga	Resistencia
G-800-1	5500	220.06
G-800-2	5550	221.89
G-800-3	5660	226.18
G-800-4	5590	223.51
G-800-5	5430	217.32
G-800-6	5200	207.9
	5488.33	219.48

0 % Sustitución

	Carga	Resistencia
G-800-1	3910	156.44
G-800-2	3830	152.99
G-800-3	3950	157.98
G-800-4	3880	155.1
G-800-5	3590	143.5
G-800-6	3850	154.12
	3835.00	153.36

28 días**20 % Sustitución**

	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	4990	199.46
<i>G-800-2</i>	4840	193.56
<i>G-800-3</i>	4750	189.97
<i>G-800-4</i>	4810	192.22
<i>G-800-5</i>	4590	183.71
<i>G-800-6</i>	4680	187.09
	4776.67	191.00

15 % Sustitución

	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	6010	240.31
<i>G-800-2</i>	5490	219.71
<i>G-800-3</i>	5560	222.24
<i>G-800-4</i>	5870	234.97
<i>G-800-5</i>	6000	239.96
<i>G-800-6</i>	5760	230.19
	5781.67	231.23

10 % Sustitución

	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	6080	243.34
<i>G-800-2</i>	6460	258.59
<i>G-800-3</i>	6080	243.2
<i>G-800-4</i>	6160	246.57
<i>G-800-5</i>	6490	259.44
<i>G-800-6</i>	6260	250.51
	6255.00	250.28

0 % Sustitución

	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	6040	241.65
<i>G-800-2</i>	5850	233.91
<i>G-800-3</i>	6300	251.98
<i>G-800-4</i>	6800	271.81
<i>G-800-5</i>	6570	262.81
<i>G-800-6</i>	6900	275.82
	6410.00	256.33

90 días**20 % Sustitución**

	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	6440	257.47
<i>G-800-2</i>	6660	266.48
<i>G-800-3</i>	6230	249.1
<i>G-800-4</i>	6240	249.45
<i>G-800-5</i>	6620	264.92
<i>G-800-6</i>	6620	264.64
	6468.33	258.68
15 % Sustitución		
	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	7120	284.61
<i>G-800-2</i>	7390	295.5
<i>G-800-3</i>	7350	294.03
<i>G-800-4</i>	5920	236.66
<i>G-800-5</i>	7120	284.82
<i>G-800-6</i>	6770	270.9
	6945.00	277.75
10 % Sustitución		
	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	6810	272.58
<i>G-800-2</i>	8620	344.72
<i>G-800-3</i>	8210	328.41
<i>G-800-4</i>	7600	303.87
<i>G-800-5</i>	7160	286.93
<i>G-800-6</i>	7290	291.43
	7615.00	304.66
0 % Sustitución		
	Carga	Resistencia
<i>G-800-1</i>	5730	229.06
<i>G-800-2</i>	5590	223.72
<i>G-800-3</i>	5940	237.43
<i>G-800-4</i>	5680	227.24
<i>G-800-5</i>	5560	222.38
<i>G-800-6</i>	6020	240.73
	5753.33	230.09