



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

PRODUCCIÓN DE CONCRETOS LIGEROS CON AGREGADOS VITROCERÁMICOS  
ELABORADOS CON LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
IVÁN EMILIO MARTÍNEZ HERRERA

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
COMITÉ TUTOR  
DR. RAFAEL SCHOUWENAARS FRANSSENS, FACULTAD DE INGENIERÍA  
DRA. MARÍA DE LOURDES CHÁVEZ GARCÍA, FACULTAD DE QUÍMICA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., noviembre de 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** Dr. Schouwenaars Franssens Rafael

**Secretario:** M.I. Gutiérrez Palacios Constantino

**Vocal:** Dra. Chávez García María de Lourdes

**1<sup>er</sup> Suplente:** Dra. Rojas Valencia María Neftalí

**2<sup>do</sup> Suplente:** Dra. Ramírez Zamora Rosa María

INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

**DRA. ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA**

  
-----  
FIRMA

A mis padres, por todo...

A la Dra. Rosa María Ramírez, por el asesoramiento y la confianza de estos dos años de trabajo. Por aceptar mi tutoría, cuando prácticamente no quedaba tiempo para ingresar al programa. Eso lo cambió todo, para bien.

Al Dr. Rafael Schouwenaars, por su aporte e implicación en este trabajo.

A Myriam, por su ayuda y colaboración durante esta etapa siempre que lo necesité, por su excelente carácter.

A la Mtra. Leticia, por su apoyo logístico durante el trabajo experimental, por los consejos.

A la Dra. María de Lourdes Chávez, por las recomendaciones hechas como parte de mi comité tutorial y las correcciones finales del documento, que contribuyeron para mejorar la tesis que se presenta.

A la Dra. María Neftalí Rojas y al M.I. Constantino Gutiérrez, por sus comentarios y observaciones sobre el documento de tesis que contribuyeron a tener un mejor trabajo.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería, por brindar sus instalaciones para el desarrollo experimental de la investigación.

Al Instituto de Ingeniería, a la UNAM, por abrirme las puertas de México, por ser instituciones de vanguardia para América Latina.

Al M.I. Miguel Ángel Zúñiga, del DICyG de la Facultad de Ingeniería, a don Maya, del taller mecánico del Instituto de Ingeniería, al Sr. Carlos, del Laboratorio de Minas y Metalurgia de la Facultad de Ingeniería, al Mtro. Jaime Díaz, del Instituto de Geología, al Dr. Manoel Cordão, de la Universidad de Brasilia, por permitir el uso de los equipos necesarios para esta investigación en cada uno de los laboratorios que gestionan, por la colaboración.

A los profesores del programa de maestría en Ingeniería Ambiental, por contribuir a mi formación profesional. En especial, a Rodrigo Takashi, por hacer la clase diferente.

A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por la beca otorgada para cursar la maestría y por la beca mixta que posibilitó realizar una estancia de investigación en Brasil. Sin estas contribuciones, no hubiera sido posible realizar ninguna de estas actividades.

Al Posgrado de Ingeniería de la UNAM, por la oportunidad de estudio brindada, por el programa de maestría, por el apoyo económico otorgado para la estancia de investigación.

Al proyecto PAPIIT IV100616, por la beca de maestría ofrecida en los meses finales del trabajo.

Al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Federal de Brasilia, por brindar sus equipos e instalaciones para la realización de los ensayos necesarios para cumplimentar esta investigación. A la Universidad Federal del Oeste de Bahía, por el soporte logístico.

A mis colegas Nelson Díaz y Miren Etxeberria, por ser ejemplos de profesionales y compartir sus experiencias, por todo el tiempo de trabajo que hemos compartido, ellos también son responsables que haya llegado hasta aquí.

A México, ese gran país.

A Victor, Stephanie, Carolina, Brenda, Tania, Claudia, Carlos, Reina, Jessica, Edwin, Arturo, Cecilia, Juan Luis, Gris, Osvaldo, por el día a día de estos dos años.

A mis padres, por estar siempre, por deberles tanto, por todo.

A mi familia, la de La Habana, la de Miami, la de Madrid.

A Abel, mi hermano de la vida. A Annie.

A Elaine, por estos años.

A mis amigos de siempre, los que traje de Cuba, aunque muchos ya andaban regados por el mundo: Alep Malagón, KP Alejo, Osvaldo, Reinier, Aylín, Alejandro, Gastón, Gilberto, Ernesto, Denia, Mauricio, Andra, Marcela, Marila, Yoelvis, Yosbel...

A la gente de Brasil: Ailín, Oisy, Elier, Mauricio, Elizabeth, Nelson, Yanet, Yadián, Anilé, Julio. Por recibirme, por echarme una mano.

A los chicos de la Cujae: Enzo, Giovany, Yohana, Carla, Mahamadou, Dayron. Por todavía andar “molestando” de vez en cuando, menos Giovany y Dayron, justo decirlo, a esos el que los “molesta” soy yo.

A Rayner, Yadira, Carla, Carlos, Creagh, Zara, Dayana, Sonia, los amigos de Cuba que México me regaló.

A Roxana, Álvaro, Dimitriv, Ulises, Emilio, Astrid, Eder, Nere, Irving (a este güey, lo vamos a encontrar...), los amigos de todas partes que México juntó, por lo *cool* que fue este tiempo. En Facebook quedan algunas pruebas.

A Paola.

## Índice de contenidos

Índice de contenidos .....	iv
Índice de figuras .....	vii
Índice de tablas.....	x
Resumen .....	1
Abstract .....	2
Introducción .....	3
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos .....	4
Hipótesis.....	5
Alcance de la investigación.....	5
1. Marco teórico .....	6
1.1. Características que definen un concreto. Tipos de concreto.....	6
1.2. Concreto ligero .....	6
1.3. Demanda de concreto .....	7
1.4. Impacto ambiental de la industria de la construcción.....	8
1.5. Estrategias para disminuir el impacto ambiental de la industria del concreto.....	10
1.5.1. Empleo de agregados reciclados en la formulación de concretos .....	11
1.5.2. Adiciones activas como reemplazo de cemento Portland.....	11
1.5.3. Adiciones inertes.....	12
1.6. Consumo de agregados .....	13
1.7. Agregados ligeros .....	13
1.7.1. Características de los agregados ligeros.....	13
1.7.2. Empleo de lodos en la producción de agregados.....	14
2. Estudio experimental de la producción de vitrocerámicos .....	19

2.1. Introducción.....	19
2.2. Materias primas: descripción, acondicionamiento y características .....	20
2.2.1. Lodos.....	20
2.2.2. Arcilla.....	21
2.2.3. Fases cristalinas de las materias primas.....	21
2.3. Producción de vitrocerámicos.....	24
2.3.1. Determinación de las variables significativas .....	25
2.3.2. Optimización del proceso de producción de vitrocerámicos. ....	30
3. Estudio experimental de la producción de concretos ligeros .....	44
3.1. Introducción.....	44
3.2. Producción de los agregados vitrocerámicos .....	45
3.3. Propiedades de los materiales empleados en la producción de concreto .....	45
3.3.1. Agregados gruesos .....	45
3.3.2. Agregado fino .....	47
3.3.3. Cemento .....	48
3.4. Diseño de la mezcla de concreto.....	48
3.4.1. Preparación de los concretos.....	49
3.4.2. Dosificación obtenida .....	55
3.5. Caracterización de los concretos producidos .....	56
3.6. Resultados y discusión.....	57
3.6.1. Densidad.....	57
3.6.2. Resistencia a la compresión .....	58
3.6.3. Resistencia relativa.....	60
3.6.4. Absorción capilar .....	61
3.7. Análisis estadístico de los resultados .....	64
4. Conclusiones .....	69

Referencias .....	70
Anexos .....	79
Anexo I. Parámetros estadísticos del diseño factorial fraccionado .....	79
Relación de definición y patrones de confusión del diseño factorial .....	79
Resultados del ANOVA para el diseño factorial fraccionado .....	79
Distribución de los residuos generados .....	80
Anexo II. Parámetros estadísticos del diseño de superficie de respuesta.....	82
Resultados del ANOVA para el diseño de superficie de respuesta .....	82
Distribución de los residuos generados .....	83
Anexo III. Efluorescencia de rayos X.....	85
Anexo IV. Determinación de las propiedades del concreto.....	86
Densidad .....	86
Absorción de agua.....	86
Resistencia a la compresión .....	87
Absorción de agua por capilaridad.....	87
Anexo V. Método de Turkey .....	90
Anexo VI. Imágenes de diferentes materiales empleados en el estudio .....	91
Anexo VII. Actividades complementarias.....	94
Congreso AIDIS.....	94
Estancia de investigación .....	94

## Índice de figuras

Figura 1.1. Proporciones de las diferentes materias primas en un concreto convencional .	6
Figura 1.2. Producción mundial de cemento, índices actuales y previsión .....	8
Figura 1.3. Aporte de diferentes materiales a las emisiones de CO <sub>2</sub> de concretos comercializados regularmente .....	9
Figura 1.4. Agregados ligeros obtenidos a partir de ceniza de lodos con diferentes tratamientos.....	16
Figura 1.5. Efecto de la temperatura de sinterización en la densidad de los agregados ..	16
Figura 2.1. Etapas del estudio experimental de producción de agregados vitrocerámicos	19
Figura 2.2. Difractograma de rayos X de la fracción fina de la muestra de lodo .....	21
Figura 2.3. Difractograma de rayos X de la fracción de lodo retenida en la malla No. 40 (0.425 mm) .....	22
Figura 2.4. Difractograma de rayos X de la fracción fina (PAN) de la muestra de arcilla ..	23
Figura 2.5. Difractograma de rayos X de la fracción de arcilla retenida en la malla No. 40 (0.425 mm) .....	23
Figura 2.6. Curva de calentamiento de la mufla empleada para la producción de los monolitos vitrocerámicos. ....	25
Figura 2.7. Influencia de los factores en la densidad de los vitrocerámicos .....	28
Figura 2.8. Influencia de los factores en la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos .....	29
Figura 2.9. Diagrama de Pareto de las variables que presentan una influencia significativa sobre la densidad de los vitrocerámicos .....	33
Figura 2.10. Superficie de respuesta de la densidad para diferentes niveles de variables	33
Figura 2.11. Superficie de respuesta para la resistencia a la compresión de los diferentes vitrocerámicos.....	34
Figura 2.12. Diagrama de Pareto de las variables que presentan una influencia significativa sobre la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos .....	35

Figura 2.13. Superficie de respuesta para la resistencia relativa de los diferentes vitrocerámicos.....	37
Figura 2.14. Diagrama de Pareto de las variables analizadas para la resistencia relativa de los vitrocerámicos .....	38
Figura 2.15. Difractograma de rayos X del vitrocerámico B1.....	41
Figura 2.16. Difractograma de rayos X del vitrocerámico C1 .....	41
Figura 2.17. Difractograma de rayos X del vitrocerámico D1 .....	42
Figura 2.18. Sistema de fases ternario MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> .....	43
Figura 3.1. Etapas del estudio experimental de producción de concretos .....	44
Figura 3.2. Distribución granulométrica de los agregados gruesos .....	46
Figura 3.3. Distribución granulométrica del agregado fino .....	47
Figura 3.4. Valor medio y desviación estándar de la densidad a 28 días de los concretos analizados .....	57
Figura 3.5. Valor medio y desviación estándar de la resistencia a la compresión a 28 días de los concretos analizados.....	59
Figura 3.6. Curvas de absorción capilar de los concretos analizados .....	62
Figura 3.7. Regresión lineal de los puntos iniciales (6h) de la curva de absorción capilar para cada uno de los concretos analizados en el trabajo.....	63
Figura A.1. Distribución de los residuos obtenidos en el diseño factorial fraccionado para el análisis de la densidad.....	81
Figura A.2. Distribución de los residuos obtenidos en el diseño factorial fraccionado para el análisis de la resistencia a la compresión .....	81
Figura A.3. Distribución de los residuos obtenidos para la densidad.....	83
Figura A.4. Distribución de los residuos obtenidos para la resistencia a la compresión ...	84
Figura A.5. Distribución de los residuos obtenidos para la resistencia relativa.....	84
Figura A.6. Curva típica de absorción de agua por el ensayo de capilaridad .....	88
Figura A.7. Monolitos vitrocerámicos empleados en el diseño de superficie de respuesta	91
Figura A.8. Monitos fabricados con la fracción fina de las materias primas.....	92

Figura A.9. Cuatro piezas de material vitrocerámico antes de la trituración .....	92
Figura A.10. Agregado vitrocerámico utilizado para la fabricación de los concretos ligeros estructurales .....	93
Figura A.11. Muestras de los concretos de agregados ligeros, se puede observar la distribución de las partículas de agregados dentro de la matriz del concreto.....	93

## Índice de tablas

Tabla 2.1. Información de las variables analizadas en la primera fase del estudio.....	26
Tabla 2.2. Matriz de diseño $2^{5-2}$ de las pruebas exploratorias para el proceso de producción de vitrocerámicos.....	27
Tabla 2.3. Propiedades de los vitrocerámicos fabricados según el diseño factorial aplicado para las pruebas exploratorias.....	27
Tabla 2.4. Características de las variables continuas analizadas para la optimización de las propiedades de los vitrocerámicos.....	31
Tabla 2.5. Diseño de superficie de respuesta con los niveles de cada variable para la optimización de la producción de agregados vitrocerámicos.....	31
Tabla 2.6. Resultados promedio de las propiedades evaluadas en los vitrocerámicos ....	32
Tabla 2.7. Nivel óptimo de las variables significativas continuas analizadas en el diseño para maximizar la resistencia a la compresión.....	35
Tabla 2.8. Nivel óptimo de las variables significativas continuas analizadas en el diseño para maximizar la resistencia relativa .....	38
Tabla 2.9. Valores óptimos de las variables para la producción de vitrocerámicos a utilizar como agregados ligeros para la elaboración de concretos estructurales .....	39
Tabla 3.1. Características de producción de los agregados reciclados .....	45
Tabla 3.2. Propiedades físicas de los agregados gruesos .....	46
Tabla 3.3. Propiedades físicas del agregado fino.....	48
Tabla 3.4. Nomenclatura y composición general de los concretos fabricados.....	48
Tabla 3.5. Asentamientos recomendados para varios tipos de objetos de obra .....	50
Tabla 3.6. Cantidad de agua requerida para la mezcla de concreto.....	51
Tabla 3.7. Relaciones agua/cemento recomendadas para diferentes resistencias a compresión .....	52
Tabla 3.8. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto .....	54
Tabla 3.9. Proporciones de materiales utilizadas para cada mezcla de concreto.....	56

Tabla 3.10. Técnicas de ensayo a utilizar para cada propiedad.....	56
Tabla 3.11. Parámetros físicos y mecánicos de los concretos producidos en este trabajo	60
Tabla 3.12. Valor promedio y desviación de las propiedades analizadas estadísticamente mediante el análisis de varianza .....	65
Tabla 3.13. Resultados del ANOVA para los valores de densidad de los concretos .....	65
Tabla 3.14. Resultados del ANOVA para los valores de resistencia a la compresión de los concretos .....	65
Tabla 3.15. Resultados del ANOVA para los valores de sorptividad de los concretos.....	66
Tabla 3.16. Valores de los parámetros utilizados en la prueba de Tukey.....	67
Tabla 3.17. Comparación por pares de los valores medios de densidad de los concretos	67
Tabla A.1. Análisis de varianza para la densidad.....	79
Tabla A.2. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión .....	80
Tabla A.3. Análisis de varianza para la densidad. Diseño superficie de respuesta .....	82
Tabla A.4. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión. Diseño superficie de respuesta.....	82
Tabla A.5. Análisis de varianza para la resistencia relativa. Diseño superficie de respuesta .....	82
Tabla A.6. Resultados de la eflorescencia de rayos X del lodo y la arcilla .....	85

## Resumen

En el presente trabajo, se emplean lodos de plantas potabilizadoras de agua, mezclados con arcilla, para la producción de materiales vitrocerámicos, con el objetivo de utilizarlos como agregados gruesos ligeros para concretos. El estudio experimental se dividió en dos etapas. En la primera etapa, se analizaron diferentes variables que intervienen en el proceso de producción del material vitrocerámico, buscando optimizar las propiedades deseadas de este material (elevada resistencia a la compresión y baja densidad) para su empleo como agregado para concreto. Se analizaron cinco variables vinculadas con el proceso de producción de los vitrocerámicos: Humedad inicial de la mezcla, utilización de molde metálico durante la calcinación, tiempo a temperatura máxima de calcinación de la mezcla, tamaño de partícula de las materias primas y porcentaje de incorporación de lodo en la mezcla. Para la planificación de la experimentación y el análisis de resultados de esta etapa, se utilizaron dos modelos estadísticos. En un inicio, se utilizó un cuarto de fracción de un modelo factorial  $2^k$ , para determinar las variables que tenían una influencia significativa sobre las propiedades analizadas y posteriormente, se empleó un diseño de superficie de respuesta para la optimización de estas variables. En la segunda etapa, a partir de los agregados vitrocerámicos producidos con base en los resultados de la etapa previa, se fabricaron y analizaron diferentes formulaciones de concreto, para definir su viabilidad técnica como concreto ligero estructural. Además de los concretos de agregados vitrocerámicos, se fabricó un concreto de agregado natural de peso normal y un concreto de agregado natural ligero, lo que permitió comparar los resultados obtenidos entre los diferentes concretos. Los resultados muestran que los vitrocerámicos fabricados con la fracción más fina de las materias primas y el empleo de hasta un 50% de contenido de lodo en la mezcla, a una temperatura máxima de 1,200 °C, son viables técnicamente para su empleo como agregados para concretos estructurales. Además, los concretos fabricados con los agregados vitrocerámicos de mejores propiedades, cumplieron los requisitos técnicos que permiten clasificarlos como concretos ligeros estructurales y no presentaron diferencias estadísticamente significativas con respecto a un concreto de agregado ligero (tezontle) natural.

## Abstract

In this work, water purification sludge mixed with clay was used for the production of glass-ceramic materials with the aim of using them as a coarse lightweight aggregate for concrete. The experimental study was divided into two stages. In the first stage, different variables involved in the production process of the glass-ceramic material were analyzed, seeking to optimize the properties of the material (high compressive strength and low density) for its use as an aggregate for concrete. Five variables associated with the production process of the glass-ceramic were analyzed: initial moisture of the mixture, the use of a metal mold during calcination, the maximum calcination temperature time of the mixture, the particle size of the raw materials, and the percentage of sludge incorporation in the mixture. For the experimental planning and results analysis of this stage, two statistical models were used. Initially, a quarter of a fraction of a  $2^k$  factorial design was used to determine the variables that had a significant influence on the properties analyzed, and later, a response surface design for the optimization of these variables was used. In the second stage, different formulations of concrete were manufactured and tested to define its technical feasibility as a structural lightweight concrete. These formulations were accomplished based on the results of the previous stage. In addition to the glass-ceramic aggregate concretes, a natural normal weight aggregate concrete and a natural lightweight aggregate concrete were manufactured in order to compare the results obtained between each concretes. The results show that the glass-ceramics made with the finest fraction of the raw materials and the use of up to 50% of sludge content in the mixture, at a maximum temperature of 1,200 °C, are technically feasible to use as aggregates for structural concrete. In addition, the concretes made with the glass-ceramic aggregates with the better properties, met the technical requirements to classify them as structural lightweight concretes with no statistically significant differences with respect to a natural aggregate (tezontle) concrete.

## Introducción

Las actividades relacionadas con la construcción de hábitats para asentamientos humanos involucran una elevada cantidad de recursos materiales y humanos. La demanda de nuevas infraestructuras, la necesidad de un hogar digno para cada ciudadano y el ciclo de vida limitado de las edificaciones, son algunos de los factores que influyen en la demanda constante de materiales y equipos para la construcción.

Los materiales de construcción presentan volúmenes de producción elevados a nivel mundial, a modo de ejemplo, se calcula que representan cerca del 70% de los materiales no combustibles comercializados en Estados Unidos [1].

El concreto es ampliamente empleado a nivel mundial para la construcción de edificaciones y otras obras de la ingeniería civil, en parte debido a su facilidad para adoptar cualquier forma y porque es relativamente económico. Este material emplea generalmente aglomerantes hidráulicos para obtener las propiedades de resistencia y durabilidad que lo caracterizan. La producción de cemento, en los primeros años del presente siglo, estaba calculada en 1.6 Gt anuales [2], no obstante, la porción de cemento en el concreto es pequeña (aproximadamente el 12% del volumen), la mayor parte de su volumen está formado por agregados tanto gruesos como finos (más del 70% del volumen total).

Los agregados utilizados para la fabricación de concreto provienen casi en su totalidad de canteras naturales. La disponibilidad de este recurso varía considerablemente de un país a otro, o incluso, en diferentes zonas de un mismo país. La explotación continua de este recurso ha provocado la escasez del mismo en muchas regiones, siendo necesario la búsqueda de alternativas para el reemplazo total o parcial de este material dentro de la dosificación del concreto.

La explotación de recursos naturales no renovables, la elevada generación de residuos derivados de diferentes procesos industriales y la capacidad demostrada por el concreto de asimilar una variedad importante de estos residuos sin comprometer su desempeño, ha motivado realizar investigación y desarrollo de diferentes formulaciones de concreto con la incorporación de materiales reciclados de diferente tipo [3].

De los diferentes tipos de residuos que se han probado con éxito para sustituir agregados naturales en el concreto, se encuentran los lodos generados en plantas de tratamiento de agua (principalmente se han utilizado lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales

y no tanto los procedentes de plantas potabilizadoras). Los lodos se mezclan en diferentes proporciones con arcilla para luego calcinarlos a temperaturas en el entorno de los 1100 °C, con este tratamiento se han obtenido productos cerámicos de elevada porosidad, los cuales se han empleado con éxito como agregados ligeros para la producción de concretos.

Los concretos ligeros, fabricados a partir del empleo de agregados ligeros manteniendo similares distribuciones del resto de materias primas, representan un volumen ínfimo de la producción mundial de concreto [4]. No obstante, este concreto brinda ventajas importantes que están siendo consideradas para ampliar su utilización dentro de la industria de la construcción.

En un estudio previo con materiales similares, se obtuvieron vitrocerámicos de baja densidad y relativamente buenas prestaciones mecánicas, tomándose esos resultados como punto de partida para la presente investigación [5].

En el presente trabajo, se utilizaron lodos generados en una planta potabilizadora de agua para la producción de agregados ligeros vitrocerámicos. Los lodos se combinaron con arcilla y se calcinan a 1200 °C obteniéndose un material vitrocerámico de elevada porosidad, este material se tritura hasta un tamaño máximo de partícula de 12.7 mm antes de ser empleado como agregado para concreto.

El estudio toma como punto de partida las siguientes consideraciones:

#### *Objetivo general*

Producir concretos ligeros estructurales utilizando agregados vitrocerámicos elaborados con lodos de plantas potabilizadoras, que cumplan con las normas aplicables para este tipo de materiales.

#### *Objetivos específicos*

1. Identificar las variables con influencia significativa sobre el proceso de producción de agregados vitrocerámicos elaborados con lodos de plantas potabilizadoras y arcilla.
2. Determinar los valores óptimos de las variables con influencia significativa sobre las principales propiedades de los agregados vitrocerámicos producidos, que permitan cumplir

los requerimientos técnicos establecidos en la norma ASTM C330/C330M-14 (Especificaciones para agregados ligeros para concretos estructurales).

3. Establecer las mejores condiciones, a través de criterios técnicos y ambientales, para la producción de concretos ligeros con agregados vitrocerámicos que permitan su uso con fines estructurales.

4. Determinar si existen diferencias significativas entre las propiedades del concreto ligero de agregados vitrocerámicos y las del concreto ligero de agregados naturales, definiendo su posible utilización en la industria de la construcción.

### *Hipótesis*

Existe al menos una dosificación de concreto ligero estructural, fabricado con agregados vitrocerámicos elaborados con lodos de plantas potabilizadoras y arcilla, cuyas propiedades físico-mecánicas y de durabilidad no difieren significativamente de las obtenidas por un concreto similar producido con agregados naturales.

### *Alcance de la investigación*

En la presente investigación se evalúa el desempeño de concretos fabricados con agregados vitrocerámicos, producidos con lodos de plantas potabilizadoras y arcilla, a través de tres propiedades (densidad, resistencia a la compresión y absorción capilar) y se compara con el de un concreto ligero de agregados naturales y el de un concreto convencional, con el fin de determinar su posible aplicación en la industria de la construcción.

## 1. Marco teórico

### 1.1. Características que definen un concreto. Tipos de concreto

Un concreto es una mezcla en diferentes proporciones de agregados gruesos, agregados finos, cemento y agua [6], [7]. Los agregados representan la mayor parte de una unidad de concreto, tanto por volumen como por peso (Figura 1.1).

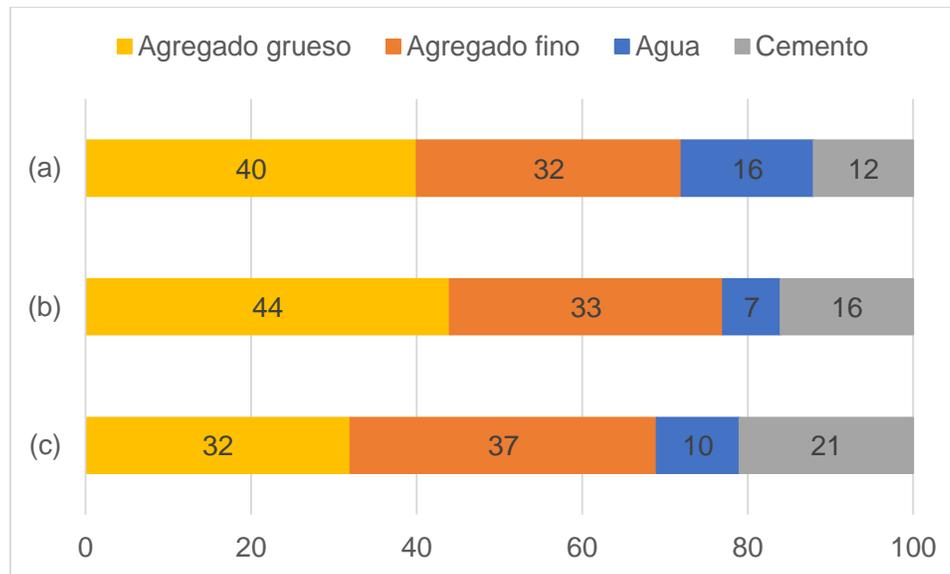


Figura 1.1. Proporciones de las diferentes materias primas en un concreto convencional. (a) Proporción por volumen, (b) Proporción por peso para concreto convencional manteniendo la distribución volumétrica de a, (c) Proporción por peso para concreto ligero, manteniendo la distribución volumétrica de a.

### 1.2. Concreto ligero

El concreto ligero estructural tiene una densidad de equilibrio que oscila de  $1,120 \text{ kg/m}^3$  a  $1,920 \text{ kg/m}^3$ , inferior a la del concreto de peso normal que varía entre  $2,240 \text{ kg/m}^3$  y  $2,480 \text{ kg/m}^3$  [8]. Posee una resistencia a la compresión mínima a los 28 días de 17 MPa y en su fabricación se utilizan únicamente agregados de peso ligero o una combinación de agregados de peso ligero y peso normal. Los agregados se combinan en una de las siguientes configuraciones:

- Agregado grueso ligero y agregado fino de peso ligero.
- Agregado grueso de peso normal y agregado fino de peso ligero.

- Agregado grueso ligero y agregado fino de peso normal.

Esta última combinación es la más empleada a escala industrial [9], por el aprovechamiento de la porosidad del material, debido a que a medida que se tritura en busca de un menor tamaño de partícula, se pierde porosidad por unidad de volumen y por tanto la densidad aumenta. Es, por tanto, la combinación que se utilizó en esta investigación.

Además de la diferencia de densidad, el costo de utilización del concreto ligero también varía con respecto al concreto convencional. El empleo de concreto ligero está justificado por la reducción del costo total del proyecto como consecuencia de la disminución del peso total de la estructura, el aumento de la funcionalidad o una combinación de ambas características. Según el ACI 213 [8], el concreto ligero es aproximadamente un 1% más costoso que el concreto convencional. Este costo, sin embargo, se compensa con las ventajas que brinda el concreto ligero. La mayor parte de los beneficios se derivan de la disminución del peso muerto de la estructura, esto permite disminuir el tamaño de los cimientos y de otros objetos estructurales como vigas y columnas. Además, en regiones donde el costo de la transportación sea significativo, el menor peso por unidad de volumen del concreto ligero puede ser beneficioso económicamente [9].

### **1.3. Demanda de concreto**

El concreto es el material de construcción más utilizado mundialmente y por tanto, responsable de una parte importante de la carga ambiental provocada por el sector de la construcción. La demanda mundial promedio es de una tonelada por persona al año. Ningún otro material, excepto el agua, es demandado por los seres humanos en tales cantidades [10], [11].

La producción mundial de concreto se prevé que siga aumentando anualmente. La estimación de este crecimiento se puede hacer a través de las previsiones existentes para la producción de cemento, debido a que este se destina casi exclusivamente para la producción de concreto (Figura 1.2). Esta tendencia implica que la demanda de agregados para la fabricación de concreto continuará aumentando, presionando aún más las reservas naturales de este material [12].

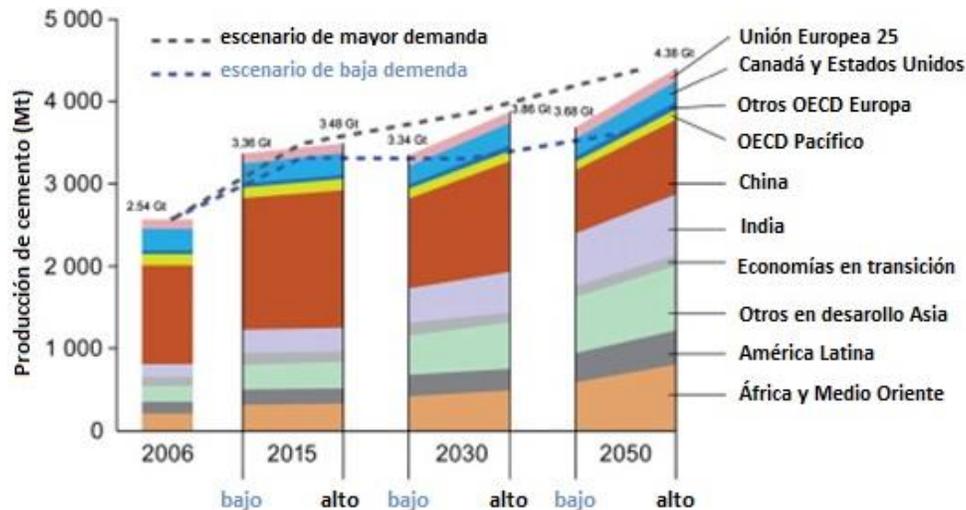


Figura 1.2. Producción mundial de cemento, índices actuales y previsión. Adaptado de Schneider et al. [12]\*.

\*Tomado de: International Energy Agency [on-line] Cement roadmap targets (2009) [http://www.iea.org/papers/2009/Cement\\_Roadmap\\_targets\\_viewing.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_targets_viewing.pdf) [Accessed 18 March 2011]

#### 1.4. Impacto ambiental de la industria de la construcción

La industria de la construcción es responsable de un importante impacto ambiental a nivel mundial. Son varios los factores que provocan este efecto:

- 1) El consumo de grandes volúmenes de materias primas (principalmente recursos minerales no renovables) para la fabricación de millones de toneladas de concreto producidas anualmente,
- 2) las emisiones de CO<sub>2</sub> inherentes a la producción de cemento Portland,
- 3) los requerimientos de energía del proceso (desde la extracción de materias primas hasta la construcción de la infraestructura), y
- 4) la generación de residuos, resultado tanto de las acciones constructivas como de la demolición de edificaciones una vez cumplida su vida útil.

Estos factores conducen a pensar que esta industria no es amigable con el ambiente, ni compatible con los actuales requisitos de desarrollo sostenible [13].

Para la producción de agregados, es necesaria la explotación de canteras de rocas o la extracción de arena principalmente de lechos de ríos. Ambas actividades, por la magnitud en que se practican, implican un fuerte uso tanto del suelo como de recursos naturales no renovables [14].

Las reservas de arena y grava en el mundo son abundantes, sin embargo, debido a restricciones ambientales, la explotación de muchos bancos de estos materiales está prohibida. La distribución geográfica de algunas zonas y la calidad de agregados requerida para algunos usos, es otro factor a considerar, debido a que hace inviable económicamente la extracción de este material.

El consumo de energía necesario para el proceso, provoca emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo de combustibles fósiles (prácticamente la única fuente de energía utilizada). La mayor contribución responde a la generación de electricidad para la trituración de las rocas, hasta un tamaño que permita su comercialización. La demanda de energía del resto de las actividades (detonación, excavación, acarreo y transporte) es menor que el 25% del consumo total. No obstante, como se observa en la Figura 1.3, estas emisiones representan solo del 13 al 20% de las emisiones asociadas a la producción de concreto [10].

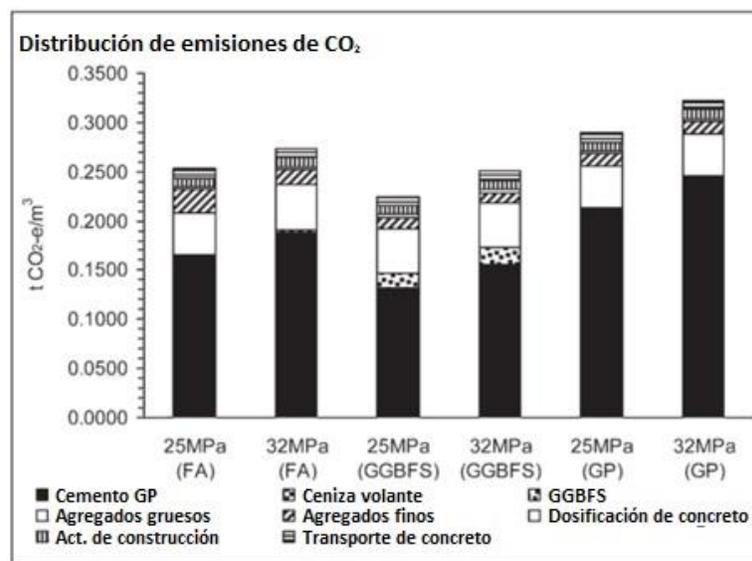


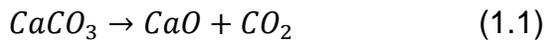
Figura 1.3. Aporte de diferentes materiales a las emisiones de CO<sub>2</sub> de concretos comercializados regularmente (FA: 25% ceniza volante, GGBFS: 40% de escoria, GP: concreto convencional).

Adaptado de Flower and Sanjayan [10].

La principal fuente de generación de gases de efecto invernadero asociados a la producción de concreto se debe al cemento Portland (del 74 al 81 %) [10]. Se ha publicado que la industria del cemento Portland es responsable del 5 % de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico [15]. Debido a esto, la disminución de las emisiones

asociadas al cemento Portland, es el tema principal de acción en lo referente al control de emisiones en la producción de concreto.

La descarbonatación de la roca caliza es un proceso inevitable para la producción de clinker, compuesto fundamental del cemento Portland. Esta descarbonatación ocurre a una temperatura aproximada de 1000 °C, según la siguiente reacción química:



El proceso libera 0.5 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de CaO producida [10]. El alto consumo de energía necesaria para la obtención del clinker provocan emisiones adicionales de CO<sub>2</sub> que se suman a las originadas por la descarbonatación, elevando el total de las emisiones de la producción de cemento Portland a un intervalo de 0.7 a 1.0 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento [10], [16], [17].

Debido a los problemas ambientales relacionados con la industria de la construcción, principalmente asociados con la producción de concreto, se ha tratado de promover formulaciones de concreto con una menor carga ambiental. La utilización de residuos industriales, de construcción y demolición y otros materiales reciclados en la fabricación de concreto, ha sido una práctica común, que ha ido en aumento a nivel mundial durante las últimas décadas [18]–[20].

### **1.5. Estrategias para disminuir el impacto ambiental de la industria del concreto**

Las acciones para minimizar el impacto ambiental de la industria del concreto se dividen en tres tipos:

- 1) Sustitución de agregados naturales por agregados reciclados (principalmente provenientes de residuos de construcción y demolición).
- 2) Reemplazo de hasta un 25% de cemento Portland por materiales con actividad puzolánica.
- 3) Introducción de materiales finos reciclados que actúen como filler<sup>1</sup> en el concreto.

---

<sup>1</sup> Material fino de relleno (menor a 0.08 mm) que no presenta reactividad con el cemento.

### *1.5.1. Empleo de agregados reciclados en la formulación de concretos*

Los agregados reciclados provienen mayoritariamente de residuos de construcción y demolición. De estos residuos, los más estudiados han sido los residuos de concreto y los de cerámica. Se utilizan por lo general las fracciones gruesas, debido a que las finas tienden a disminuir las propiedades del concreto. Los agregados cerámicos se han utilizado en la elaboración de diferentes tipos de concretos: no estructurales [21], para adoquines [22], [23] y estructurales en sustituciones hasta un 25% [24]. Los agregados reciclados de concreto han sido estudiados por un mayor número de autores, registrándose variedad de aplicaciones, como son el concreto de altas prestaciones [25], [26] y el auto-compactante [27], [28], pero su mayor aplicación ha sido para concreto estructural convencional. Con el agregado fino reciclado se han fabricado concretos de más de 30 MPa [29] y 50 MPa [30] y se han realizado estudios de durabilidad de los mismos con sustitución parcial y total de agregado fino [31], y se recomienda no emplearlo en sustituciones superiores al 30% [32]. Las propiedades físicas y la resistencia mecánica de los concretos reciclados varían en función del porcentaje de sustitución, del tipo de agregado reciclado, de la dosificación y de la relación agua/cemento (a/c) utilizada [33]–[37].

La durabilidad se ve afectada por la presencia de agregados reciclados, con mayor influencia en las propiedades relacionadas con la porosidad y la permeabilidad [35], [38], [39], lo que promueve el empleo de puzolanas en este tipo de concretos [40]–[42].

Además de los residuos de construcción y demolición, otros residuos se han empleado para la producción de concretos. Con escorias procedentes de la producción de la industria del acero, se han obtenido agregados gruesos factibles para su empleo en concretos. Las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos concretos fueron satisfactorias, incluso con el empleo de agregados finos reciclados de residuos de concreto [43], [44].

Los lodos generados en plantas de tratamiento de agua también se han incorporado en formulaciones de concretos. Principalmente se han utilizado lodos de tratamiento de aguas residuales [45], aunque existen algunos trabajos con lodos de plantas potabilizadoras [46]. Estos residuos se han empleado para la obtención de agregados gruesos ligeros [47], [48].

### *1.5.2. Adiciones activas como reemplazo de cemento Portland*

Las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la producción de cemento Portland, ha motivado que la disminución de su contenido en la fabricación de concreto haya sido

estudiada ampliamente desde la pasada década. Para este fin, se han empleado materiales de diferente procedencia con actividad puzolánica y en menor medida, materiales con actividad hidráulica [13].

La microsílíce, residuo industrial generado en la producción de silicio metal y ferrosilicio, es una de las puzolanas de mayor comercialización debido a su elevada actividad puzolánica, siendo muy utilizada en concretos de alto desempeño [49], [50]. Otras puzolanas de origen reciclado (ceniza de cáscara de arroz, ceniza de bagazo de caña, entre otras) han mostrado tener índices de actividad adecuados para su uso como reemplazo de cemento [51]–[53]. La ceniza de cáscara de arroz, además, permite durante su combustión la generación de energía, al ser la cáscara de arroz una biomasa capaz de auto-combustionar [54].

Entre las puzolanas de origen reciclado analizadas para sustituir diferentes porcentajes de cemento Portland, en dosificaciones de concreto, se encuentra la ceniza de lodos de plantas de tratamiento de aguas. La actividad puzolánica de este material ha mostrado ser menor que las ofrecidas por otros materiales reciclados como la microsílíce y la ceniza de cáscara de arroz, no obstante, se han publicado comportamientos aceptables para sustituciones de cemento menores de 15% [55].

### 1.5.3. Adiciones inertes

Con el objetivo de disminuir la porosidad en el concreto y aumentar de esta forma sus desempeños mecánicos y de durabilidad, se emplean materiales finos (*fillers*) que rellenen los espacios inter-granulares dejados por la matriz de agregados gruesos y finos. Teniendo en cuenta los altos volúmenes de residuos generados por las diferentes actividades humanas y la capacidad del concreto de asimilar en su formulación algunos de estos residuos, diferentes estudios se han enfocado en el empleo de materiales reciclados como *fillers* en el concreto [56]–[58].

La cantidad incorporada en el concreto de este tipo de materiales varía en cuantías inferiores a 20 % [57]. Su utilización depende del diseño de la mezcla de concreto, donde intervienen índices como la cantidad de pasta con respecto al volumen de los poros de la matriz de los agregados, la relación (másica) agua/cemento requerida, la trabajabilidad, entre otros.

Tanto la disminución de la porosidad como la incorporación de materiales reciclados brindan beneficios ambientales que favorecen el balance de la industria del concreto. Con

la disminución de la porosidad se debe incrementar la durabilidad del concreto, con esto se logra un mayor tiempo de vida útil y, por tanto, se reduce la generación de residuos por unidad de tiempo. A esto se debe añadir, que la incorporación de materiales reciclados en la formulación del concreto, también contribuye a disminuir la generación de residuos.

## **1.6. Consumo de agregados**

El único dato encontrado sobre la producción mundial de arena y grava data de 1975 y la estimaba en 6,760 millones de toneladas [59], [60]. No obstante, teniendo en cuenta las proporciones mostradas en la Figura 1.1, se realiza una correlación con los datos de producción mundial de concreto brindados por *Ashby* [11]. Con este manejo de datos, se deduce que en la actualidad se emplean anualmente aproximadamente 12,000 millones de toneladas de agregados gruesos. Esto convierte a los agregados para concreto en el mineral no combustible más explotado a escala mundial.

Teniendo en cuenta los datos brindados anteriormente y la posibilidad de reemplazar los agregados naturales por materiales reciclados, se aborda en el presente trabajo el empleo de lodos para la producción de agregados para concretos ligeros.

## **1.7. Agregados ligeros**

### *1.7.1. Características de los agregados ligeros*

El componente que caracteriza a los concretos ligeros es el tipo de agregado. Normalmente los agregados utilizados en la fabricación de concreto convencional tienen una densidad entre 2,400 y 2,800 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, los agregados empleados para producir concretos ligeros presentan una densidad que oscila entre 800 y 2,000 kg/m<sup>3</sup> [61]. Esta baja densidad se debe a la estructura porosa que presentan estos materiales [62].

Los agregados ligeros son obtenidos de materiales naturales (extraídos de rocas de diferente clasificación geológica) o de materiales artificiales. Entre los naturales, los más utilizados son: piedra pómez, tezontle, cenizas volcánicas y diatomitas [63]. Los de origen artificial se obtienen luego de procesar diferentes materias primas, como arcilla o esquisto, y también se han obtenido a partir de residuos generados por procesos industriales (cenizas volantes granuladas o extruidas, escorias expandidas) [64], [65].

Estos agregados son de interés debido a que su densidad y peso unitario bajos, permiten una disminución de las cargas transmitidas al suelo y un menor esfuerzo para su transportación [66]. Existen otros beneficios asociados a este material, como son su buen desempeño como aislantes térmicos y acústicos, y sus buenos índices de resistencia al fuego [18], [62].

Los agregados ligeros, tanto naturales como artificiales, deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C330 para su empleo en la producción de concreto [67]. Este tipo de agregado, afecta significativamente la dosificación de la mezcla de concreto. Esto se debe a la alta porosidad que presentan, lo que provoca una elevada absorción de agua y, por lo tanto, la alteración de las proporciones de la mezcla original. En los concretos de peso normal, las proporciones de la mezcla se calculan a partir de una condición de humedad de los agregados que resulta sencilla de determinar a escala de laboratorio o incluso en obra. Para los concretos ligeros, el problema principal es contabilizar correctamente la humedad y la absorción de los agregados ligeros [9].

#### *1.7.2. Empleo de lodos en la producción de agregados*

Los agregados ligeros artificiales se obtienen a través del calentamiento rápido a altas temperaturas de materiales que presentan capacidad de expansión. Dos condiciones han sido marcadas como necesarias para lograr la correcta estructura porosa de estos materiales [66], [68]:

- 1- Deben contener sustancias que liberen gases a altas temperaturas (T1),
- 2- Deben contar con una fase plástica, con una viscosidad suficiente para atrapar los gases liberados a la temperatura T1.

La producción de agregados ligeros a partir de las cenizas de los lodos ha demostrado ser beneficiosa para su uso potencial en el Reino Unido, no obstante, los factores que fueron identificados (y se relacionan a continuación) pueden ser generalizados a otros países [61]:

- El costo de depositar los lodos en rellenos sanitarios se ha incrementado debido a directivas ambientales establecidas por la Unión Europea [69].
- El costo de los agregados naturales, también ha aumentado debido a los impuestos relacionados con la explotación de canteras de agregados.
- La disponibilidad de agregados naturales en algunas zonas no es elevada, particularmente cerca de asentamientos humanos. Por lo tanto, es necesario el

transporte de agregados a grandes distancias con las implicaciones económicas y ambientales que esto representa.

- Las plantas de incineración de lodos tienden a estar situadas cerca de zonas urbanas, donde se desarrollan actividades de la industria de la construcción. En consecuencia, una fuente potencial de agregados se encuentra disponible cerca de los sitios en los que se podrán utilizar.
- La disponibilidad de un residuo de bajo costo permite el desarrollo de productos con agregados ligeros que brinden beneficios como aislantes térmicos y sonoros.

Varios autores han abordado el tema de la producción de agregados ligeros a partir de los lodos de las aguas residuales. Los estudios han analizado las propiedades tanto de los agregados como de los concretos fabricados a partir de ellos. Las principales variables a controlar en el proceso son la temperatura y el tiempo de calcinación de los lodos, así como las proporciones en que deben ser mezclados con otros materiales, principalmente arcilla, para obtener mejores desempeños [45].

Las propiedades principales a evaluar para los agregados son la densidad y la absorción de agua (la forma también puede ser importante), y para los concretos, la resistencia a la compresión y la densidad.

La temperatura de sinterización empleada para la obtención de los agregados ligeros varía entre 1,000 y 1,100 °C [70]–[73]. En las Figuras 1.4 y 1.5 se muestra la influencia que presenta tanto la temperatura de sinterización, como el tiempo en las propiedades de los agregados. Como se observa, pequeñas variaciones en el tratamiento brindan diferencias importantes en las propiedades de los agregados.

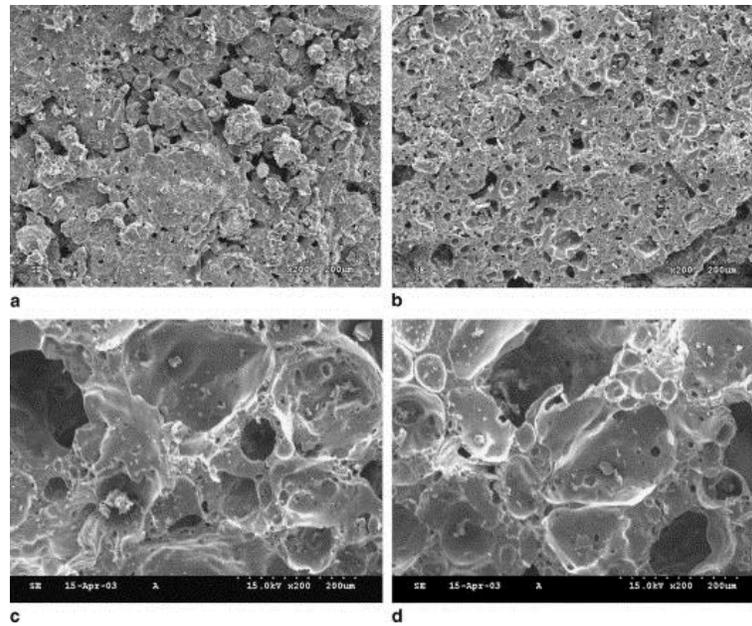


Figura 1.4. Agregados ligeros obtenidos a partir de ceniza de lodos con diferentes tratamientos: (a) 1050 °C/10 min; (b) 1050 °C/20 min; (c) 1100 °C/10 min; (d) 1100 °C/20 min [72].

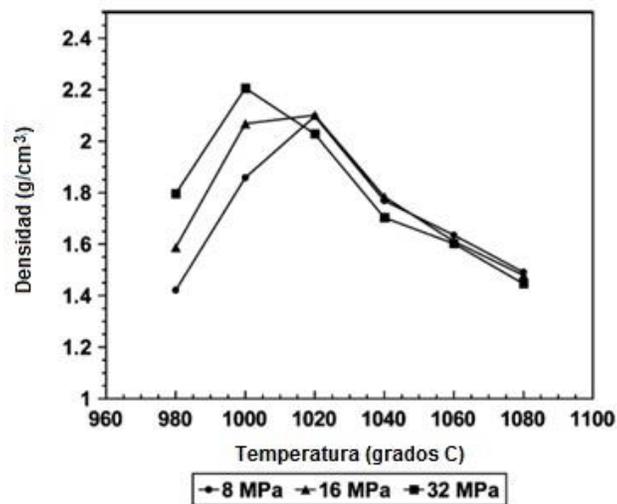


Figura 1.5. Efecto de la temperatura de sinterización en la densidad de los agregados. Adaptado de Cheeseman et al. [74].

Las propiedades de los agregados ligeros vitrocerámicos obtenidos a partir de lodos, muestran ser similares a las de los agregados naturales comercializados. Los concretos obtenidos poseen una densidad entre 1,400 y 1,500 kg/m<sup>3</sup> [48]. Aunque la estructura porosa

y la irregularidad de las partículas presentadas por los agregados vitrocerámicos reducen la trabajabilidad de la pasta fresca [75].

Para la sinterización de los lodos se han empleado diferentes mezclas, para una proporción por peso de arcilla y lodos de 1:3, se obtuvieron agregados ligeros con propiedades físicas como densidad, absorción de agua, pérdida por abrasión y resistencia al desgaste similares o superiores a la de los agregados ligeros comercializados regularmente. No obstante, tanto la resistencia a la flexión como a la compresión de los concretos disminuía gradualmente con el aumento del contenido de lodos en los agregados, por lo que se clasificaron como concretos ligeros no estructurales [48]. La adición de ceniza volante posibilita una disminución de la temperatura de sinterización, se debe tener cuidado en su empleo, debido a que la composición de la ceniza volante puede ser variable [73]. En Wang et al. [70], produjeron agregados ligeros de alta calidad a una temperatura de sinterización de 1,100 °C, mezclando hasta un 25% de ceniza de carbón con la ceniza de lodos, estas condiciones fueron identificadas como óptimas.

La conductividad térmica de estos concretos también ha sido analizada, y los resultados medidos se sitúan en el intervalo de 0.59 a 0.73 W/mK (watts por metro Kelvin), siempre menor que la de los concretos convencionales [48].

A pesar del gran número de investigaciones realizadas, la variabilidad en la composición de los lodos y características únicas de cada proceso, hace necesario que cada caso particular requiera un estudio previo para conocer las mejores condiciones de operación. Además, no son muy numerosos los estudios que tratan los desempeños a edades avanzadas de los concretos y los relativos a la durabilidad de estos. Entre las propiedades que necesitan un estudio más detallado, se encuentra la posible reactividad de los agregados fabricados a partir de lodos con los álcalis del cemento, por los efectos negativos que tiene sobre el concreto.

#### *1.7.2.1. Reactividad álcali-agregados*

La reactividad álcali-agregados es una reacción expansiva que ocurre en el interior del concreto. Se manifiesta de tres formas: a) Reacción Álcali – Sílice, b) Reacción Álcali – Carbonatos, c) Reacción Álcali – Silicatos. La más común de las tres es la reacción álcali – sílice, existiendo varios estudios que analizan su comportamiento.

La reactividad álcali-sílice es una reacción química dentro del concreto entre algunos componentes silíceos presentes en los agregados y los álcalis liberados durante la hidratación del cemento Portland [7], [76].

Para que ocurra la reacción álcali-sílice son necesarios tres factores principales:

- presencia de humedad,
- contenido alto de álcalis y
- cantidad crítica de sílice reactiva en los agregados.

Las medidas de mitigación de este fenómeno están encaminadas a controlar uno de estos tres factores. Teniendo en cuenta que la presencia de humedad en el concreto es prácticamente inevitable, y que la condición de potencialmente reactivo de los agregados no es controlable, a menos que se cambie el tipo de agregado, la disminución del contenido de álcalis en el concreto se considera como la medida de mitigación de mayor efecto práctico [7].

La reducción de los álcalis del cemento se logra a través del empleo de un material puzolánico en la mezcla, este es capaz de reaccionar con el hidróxido de calcio liberado en la reacción del cemento y formar silicatos cálcicos hidratados. La otra forma de control, es a través de la utilización de cementos con bajos contenidos de álcalis, según la siguiente ecuación [7]:

$$Na_2O_{eq} = 0.658 \cdot K_2O + Na_2O < 0.60\% \quad (1.2)$$

Los agregados vitrocerámicos obtenidos a partir de lodos, presentan por lo general contenidos elevados de silicio. Teniendo en cuenta esta característica, se señala la conveniencia de realizar pruebas de reactividad entre los álcalis del cemento y los agregados para conocer la posibilidad de ocurrencia de esta reacción en el interior del concreto.

## 2. Estudio experimental de la producción de vitrocerámicos

### 2.1. Introducción

El estudio experimental para la producción de agregados vitrocerámicos se compuso de siete etapas o actividades que se presentan en la Figura 2.1.

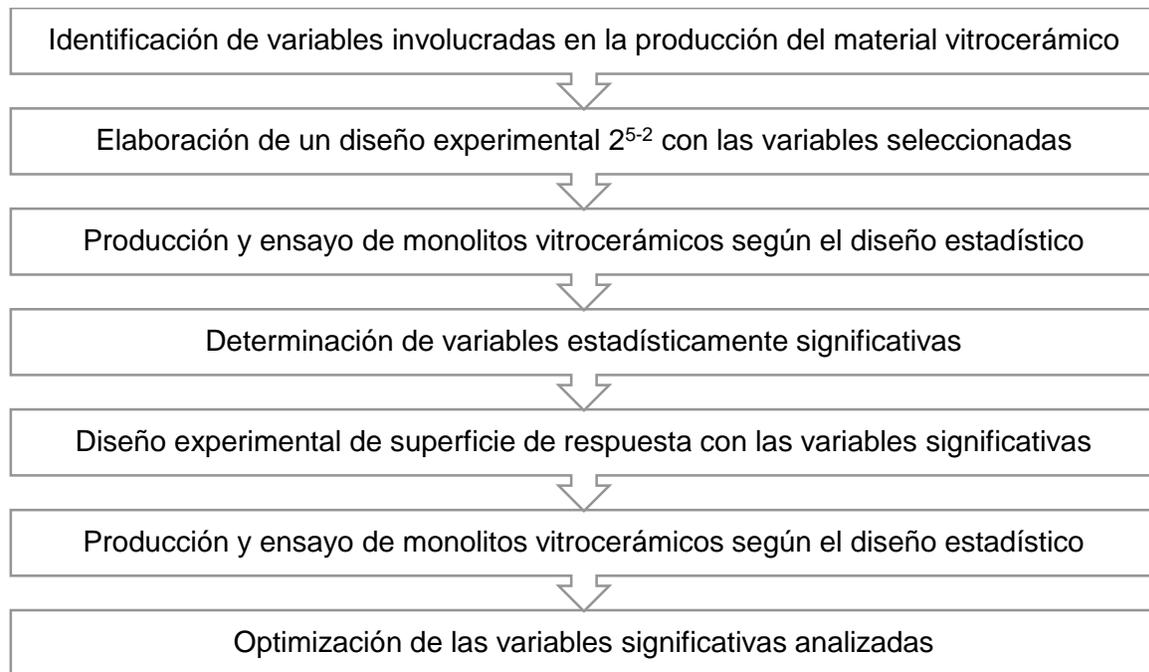


Figura 2.1. Etapas del estudio experimental de producción de agregados vitrocerámicos.

Como primera actividad, se identificaron las variables involucradas en la producción del material vitrocerámico y posteriormente se determinó las que presentaban una influencia estadísticamente significativa sobre la densidad y la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos. El modelo estadístico empleado en este análisis fue un diseño factorial fraccionado ( $2^{5-2}$ ). Las variables significativas detectadas se analizaron a un mayor número de niveles. Con esto se logró obtener la superficie de respuesta para cada propiedad, de los diferentes niveles de estas variables. Además, se realizó una caracterización química a través del DRX<sup>2</sup>, tanto de las materias primas como de las formulaciones de vitrocerámicos

---

<sup>2</sup> Difracción de Rayos X.

que presentaron las mejores propiedades. A partir de estos resultados, se seleccionan los niveles óptimos de las variables significativas, con el fin de producir vitrocerámicos adecuados para su empleo como agregados ligeros.

## **2.2. Materias primas: descripción, acondicionamiento y características**

En la presente investigación, para la producción del material vitrocerámico, se emplearon como materias primas, lodos provenientes de una planta potabilizadora y arcilla. Las características y procesamientos empleados con estos materiales se describen a continuación.

### *2.2.1. Lodos*

La muestra de lodo empleada en la presente investigación fue colectada en la planta potabilizadora “Los Berros”. Esta planta es una de las mayores instaladas en México y genera aproximadamente 13,000 ton de lodos por año [5], [63], se encuentra ubicada en el municipio de Villa Victoria, Estado de México. La muestra se tomó de la estructura de almacenamiento de los lodos perteneciente a la planta. Las coordenadas del punto de muestreo son las siguientes: 19° 22' 39.72" N y 100° 04' 38.70" O.

La composición de los lodos generados de una misma fuente puede presentar variaciones [77]. Sin embargo, según un estudio previo publicado por Ramírez et al [46], la variabilidad de las características de los lodos generados en Los Berros durante diferentes épocas del año no presenta diferencias significativas.

Los lodos recolectados en la planta poseían una elevada humedad inicial y se almacenaron en bidones plásticos herméticos conservando las propiedades desde su recolección hasta el momento de su utilización.

Para su empleo en la fabricación de vitrocerámicos, el primer paso fue secar los lodos hasta alcanzar peso constante, para este fin se utilizó la energía solar. Luego se trituraron y tamizaron separando las fracciones retenidas en los tamices No. 30 (0.600 mm), No. 40 (0.425 mm), No. 50 (0.300 mm) y el material más fino que este último tamiz identificado por las siglas PAN<sup>3</sup>. Cada una de estas fracciones se utilizó por separado para la fabricación

---

<sup>3</sup> Para esta última fracción identificada como PAN, también se utiliza la numeración de 0.149 mm (tamiz normado No. 100), empleando este número para el procesamiento numérico.

del material vitrocerámico. Esta fue una de las variables analizadas en el proceso de producción como se describirá en este capítulo.

### 2.2.2. Arcilla

La arcilla empleada en el presente trabajo se obtuvo del municipio de San Andrés Chiautla, perteneciente al Estado de México (coordenadas: 19° 34' 21.12" latitud norte y 98° 53' 34.85" longitud este). Este material es habitualmente empleado como materia prima para la fabricación de ladrillos por productores de la zona.

Con la arcilla se realizó un tratamiento similar al realizado con los lodos: secado, trituración y tamizado. De las cuatro fracciones que se separan en el proceso (0.600 mm, 0.425 mm, 0.300 mm y PAN), la fracción fina es la que se obtiene en mayor proporción, representando aproximadamente el 50% del total.

### 2.2.3. Fases cristalinas de las materias primas.

En la Figura 2.2 se muestra el difractograma de la fracción fina de la muestra de lodo, y en la Figura 2.3 se muestra el de la fracción retenida en la malla No. 40 (0.425 mm).

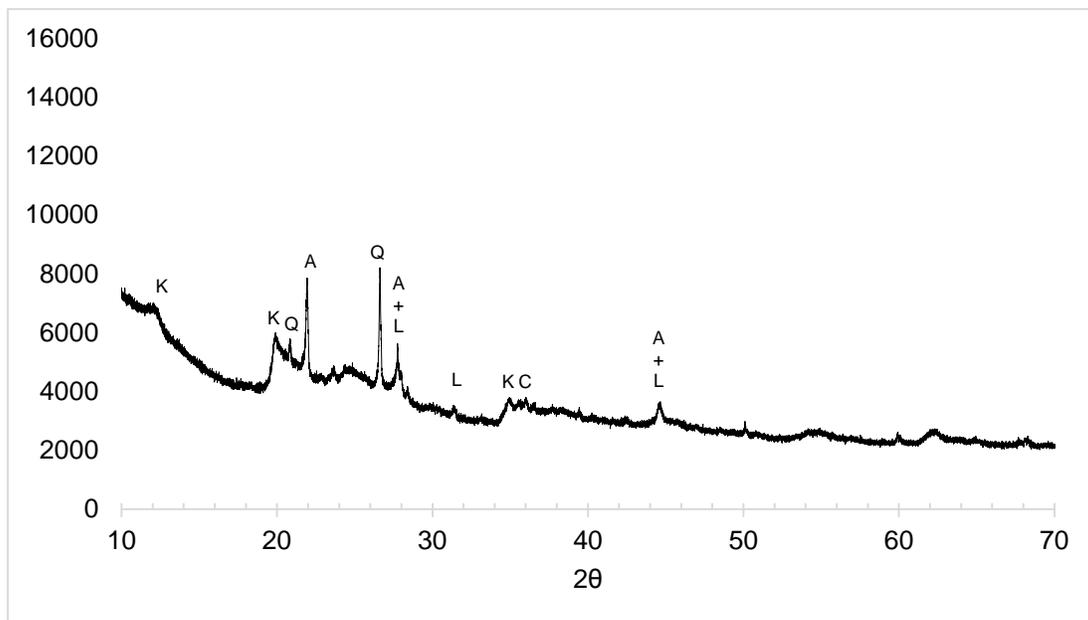


Figura 2.2. Difractograma de rayos X de la fracción fina de la muestra de lodo. A: albita, K: caolinita, Q: cuarzo.

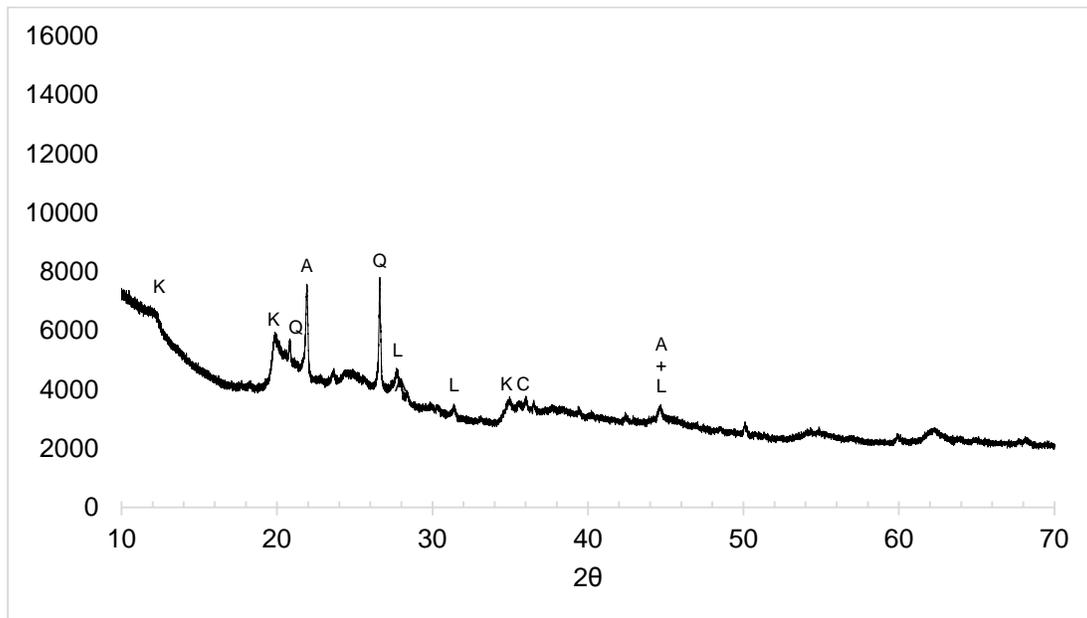


Figura 2.3. Difractograma de rayos X de la fracción de lodo retenida en la malla No. 40 (0.425 mm).  
A: albita, K: caolinita, Q: cuarzo.

En las Figuras 2.2 y 2.3 se observa que ambas fracciones de lodos presentan, como fases cristalinas, mica-illita y caolinita. Además de estas fases, en la composición de la fracción PAN, se detecta la presencia de albita y cuarzo.

La composición del lodo analizado (Figuras 2.2 y 2.3), presenta los componentes señalados como necesarios para la elaboración de materiales cerámicos [5]. En ambas fracciones se observa la presencia de caolinita, compuesto que le brinda plasticidad a la mezcla. Igualmente, se identifica la presencia de feldespatos, en este caso la albita (plagioclasas de composición intermedia), que disminuyen el punto de fusión de la mezcla por lo que es considerado como un material fundente. Además, se observa la presencia de cuarzo, compuesto que se considera como refractario [78], [79].

A pesar de haberse detectado estos tres tipos de compuestos en los lodos, éstos no pueden emplearse solos para la fabricación de vitrocerámicos, debido a que no puede lograr la plasticidad necesaria de la mezcla y, por lo tanto, se necesita mezclarlos con arcilla.

En las Figuras 2.4 y 2.5 se muestran los resultados del DRX realizado sobre las muestras de arcilla de fracción fina y la fracción retenida en la malla No. 40 (0.425 mm) respectivamente.

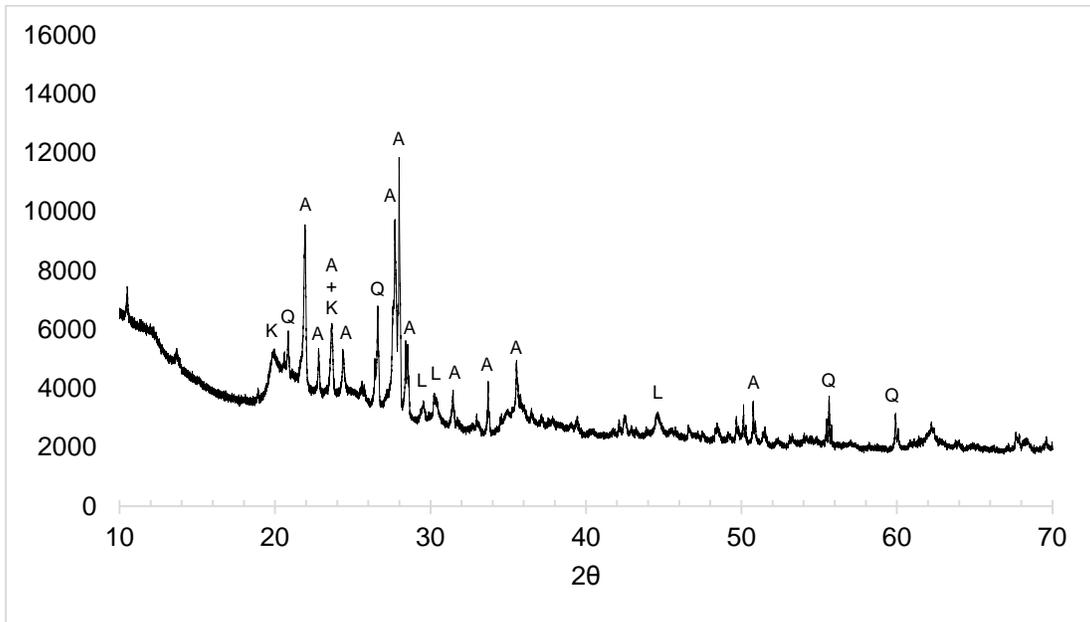


Figura 2.4. Difractograma de rayos X de la fracción fina (PAN) de la muestra de arcilla. A: albita, K: caolinita, Q: cuarzo.

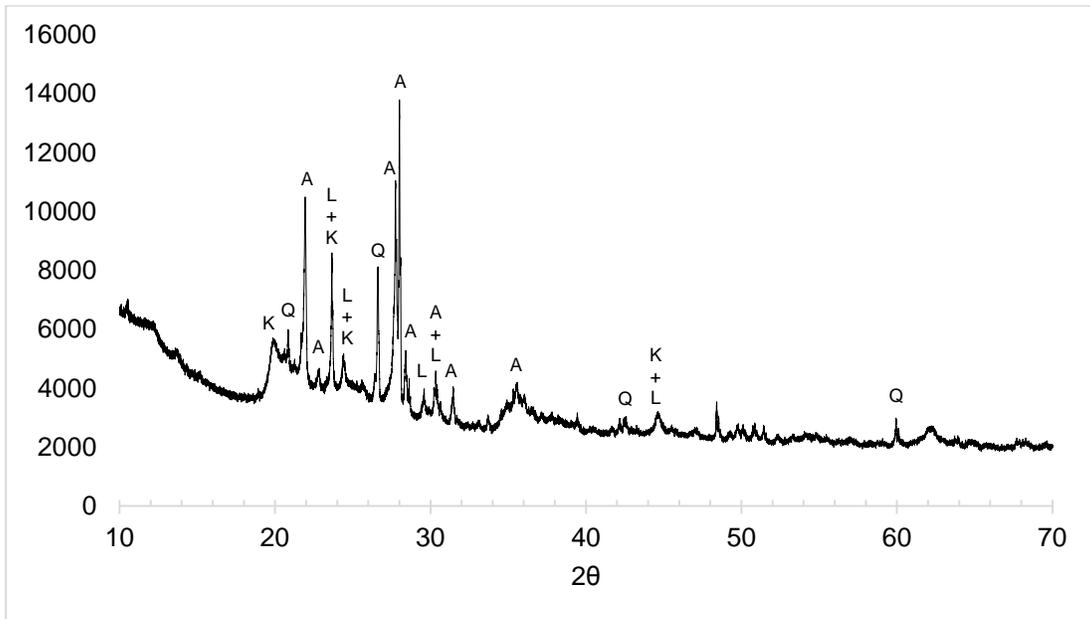


Figura 2.5. Difractograma de rayos X de la fracción de arcilla retenida en la malla No. 40 (0.425 mm). A: albita, K: caolinita, Q: cuarzo.

Las fases cristalinas presentes en ambas fracciones de arcilla son similares, como se observa los difractogramas mostrados (Figuras 2.4 y 2.5). Los compuestos identificados

para las fracciones de arcilla coinciden con los encontrados en las fracciones de lodos analizadas.

### **2.3. Producción de vitrocerámicos**

Para la fabricación del material vitrocerámico se realizaron mezclas de arcilla y lodo en diferentes proporciones, para todos los casos, las fracciones de arcillas y lodos utilizadas para una mezcla, tenían el mismo tamaño de partículas. A cada una de las mezclas realizadas se le adicionó agua hasta alcanzar la plasticidad necesaria que permitiera moldearla fácilmente. Posteriormente, a la mezcla se le confiere una forma aproximadamente cilíndrica, que permitiera insertarla en un molde metálico de forma prismática (base cuadrada de 5.0 cm y altura de 9.5 cm) con un orificio cilíndrico interior de 3.8 cm de diámetro. La utilización del molde metálico es otra de las variables consideradas al inicio del estudio; cuando no se empleó el molde en la calcinación, a la mezcla se le dio la misma forma pero fue introducida en la mufla sin molde, además, a algunas muestras se le sometió a un proceso previo de secado como se especifica en el diseño experimental. Luego de este proceso la mezcla arcilla/lodo se introdujo en una mufla y se sometió a calentamiento a una temperatura máxima de 1,200 °C. La rampa de calentamiento que proporcionó la mufla para alcanzar esa temperatura se muestra en la Figura 2.6. Luego de alcanzar la temperatura máxima, ésta se mantuvo por un período de entre 10 y 50 min, según lo establecido en el diseño para cada caso. Tanto la rampa de calentamiento como la temperatura máxima, así como el tiempo que permanece la mezcla a esta temperatura, son parámetros que han mostrado tener influencia en las propiedades físicas de los vitrocerámicos, principalmente en la densidad y distribución de los poros del material [80].

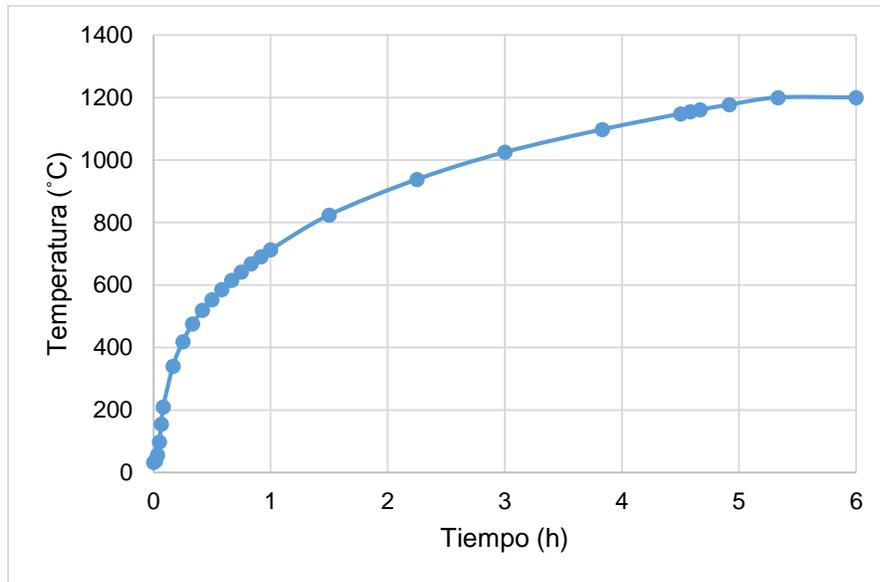


Figura 2.6. Curva de calentamiento de la mufla empleada para la producción de los monolitos vitrocerámicos.

### 2.3.1. Determinación de las variables significativas

En el proceso de fabricación de vitrocerámicos se analizaron cinco variables principales: humedad inicial, empleo de molde, tiempo a temperatura máxima, contenido de lodo y tamaño de partículas. Ante la incertidumbre inicial sobre cuál de estas variables tendría un efecto significativo en las propiedades del material, se optó por emplear en un inicio un diseño experimental de baja resolución. De esta forma, se analizarían los efectos principales de cada variable y una vez identificadas las de mayor influencia, estas se estudiarían con un mayor nivel de precisión. El diseño seleccionado fue un cuarto de fracción de un diseño factorial  $2^k$ .

#### 2.3.1.1. Diseño experimental

Los experimentos fraccionados son un tipo de diseño derivado del factorial completo; en los que únicamente un subconjunto (o fracción) del mismo se analiza. Esto se hace porque no siempre es posible llevar a cabo el diseño factorial completo, ya sea porque el número de tratamientos necesarios excede el presupuesto disponible, el tiempo disponible para la obtención de resultados no es suficiente, solo se requiere información sobre los efectos principales u otros motivos. Estos diseños son recomendados principalmente en las etapas

iniciales de la investigación cuando no hay certeza de la influencia de las variables a estudiar [81].

Al emplear un cuarto de fracción del diseño factorial se reduce en tres cuartas partes el número de experimentos necesarios para el estudio de los factores. En este caso, al analizar cinco variables, se emplea la notación  $2^{5-2}$ , que se obtienen con base en la siguiente ecuación [82]:

$$\frac{1}{4}2^5 = 2^{-2}2^5 = 2^{5-2} \quad (2.1)$$

En el Anexo I, se describe la relación de definición, el generador y los patrones de confusión del diseño empleado, parámetros que permiten la estructuración e identificación del diseño estadístico propuesto. En la Tabla 2.1, se muestra la codificación utilizada para cada variable y los valores numéricos que representa cada nivel. La Tabla 2.3 muestra los niveles a considerar de cada variable para cada uno de los ocho tratamientos a realizar.

Tabla 2.1. Información de las variables analizadas en la primera fase del estudio.

Variable	Tipo	Código	Nivel alto (+)	Nivel bajo (-)
Humedad inicial	continua	A	máximo	mínimo
Molde	categoría	B	Sí	No
Tiempo Tmax*	continua	C	50	10
Contenido lodo	continua	D	70	30
Tamaño partículas	continua	E	0.425	PAN

\*Tmax: Temperatura máxima

Se seleccionó como valor de humedad máxima el que se mide en la mezcla arcilla/lodo luego de la adición de agua para su moldeo, y el dato seleccionado para la humedad mínima fue el que posee esa mezcla al final de 6 horas de calentamiento en una estufa a una temperatura de 90 °C.

Tabla 2.2. Matriz de diseño  $2^{5-2}$  de las pruebas exploratorias para el proceso de producción de vitrocerámicos

Tratamientos	Variables				
	A	B	C	D	E
1	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-
3	-	-	+	+	-
4	+	-	+	-	+
5	-	+	-	-	+
6	+	-	-	-	-
7	-	-	-	+	+
8	+	+	-	+	-

### 2.3.1.2. Resultados de las pruebas exploratorias

Para los tratamientos de la Tabla 2.2 se evaluaron dos propiedades en los vitrocerámicos fabricados, la densidad y la resistencia a la compresión mecánica. Se propuso determinar la combinación que ofreciera de forma simultánea una baja densidad y una elevada resistencia a la compresión.

En la Tabla 2.3 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los tratamientos propuestos. Se observa que los valores de densidad de cada una de las formulaciones utilizadas son similares. Sin embargo, los valores de la resistencia a la compresión muestran marcadas diferencias. Destacan principalmente los resultados del tratamiento 7, el cual presenta valores de compresión prácticamente nulos. Para comprobar la influencia de cada una de las variables sobre estas propiedades, y con el fin de obtener un material con los mejores desempeños posibles, se realizó un procesamiento estadístico a los resultados obtenidos.

Tabla 2.3. Propiedades de los vitrocerámicos fabricados según el diseño factorial aplicado para las pruebas exploratorias.

Vitrocerámico	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la compresión (MPa)
1	1,110	3.32

2	1,030	9.31
3	1,050	2.09
4	1,240	2.27
5	1,140	6.60
6	1,380	5.86
7	1,010	0.59
8	1,240	8.10

2.3.1.3. Análisis estadístico: Identificación de las variables significativas

Con base en el gráfico de Pareto obtenido en el análisis estadístico de los resultados de las pruebas exploratorias, para un nivel de confianza del 95 %, se determinó que ninguno de los cinco factores evaluados en la producción de vitrocerámicos, tuvo una influencia significativa sobre la densidad del material. En la Figura 2.7 se muestran estos resultados.

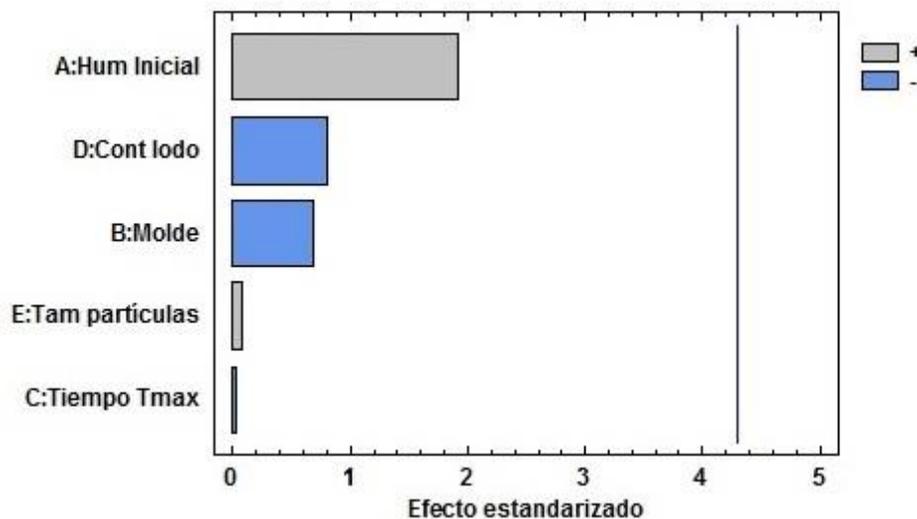


Figura 2.7. Influencia de los factores en la densidad de los vitrocerámicos. Nomenclatura: Hum Inicial: humedad inicial; Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas; Tiempo Tmax: tiempo a temperatura máxima.

La baja influencia de las variables se puede atribuir a que para la fabricación de los vitrocerámicos se utilizó la misma cantidad de materias primas, variando únicamente la cantidad de agua, en función de los requerimientos de plasticidad de la mezcla. La matriz

física del vitrocerámico presenta variaciones visuales (color, textura) considerables, sin embargo, como todas las mezclas poseen el mismo peso inicial de materias primas (el agua de amasado se evapora durante la calcinación), y aproximadamente el mismo volumen, no se obtuvieron diferencias significativas en la densidad final de las piezas.

El análisis estadístico realizado a los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión mostró resultados diferentes. El modelo, sin procesar, no posee los grados de libertad suficientes para realizar una estimación del error, pero si se eliminan los efectos de segundo orden y solo se analizan los efectos principales, es posible determinar las variables con influencia significativa.

La influencia de cada una de las variables se muestra en la Figura 2.8. Como se puede observar, de las cinco variables analizadas, tres presentan una influencia significativa en la resistencia a la compresión del material. Estas variables fueron: el contenido de lodo de la mezcla, el tamaño de partícula de las materias primas y el empleo de un molde metálico durante la calcinación. Para el caso del molde, el valor alto resultó ser el más favorable, por tanto, es necesario el empleo del molde en la calcinación de la mezcla. Para las otras dos variables significativas, el valor bajo de las mismas mostró ser el más favorable. No obstante, como se trata de variables continuas, se analizarán a un mayor número de niveles, con el objetivo de tener una mayor precisión en los resultados.

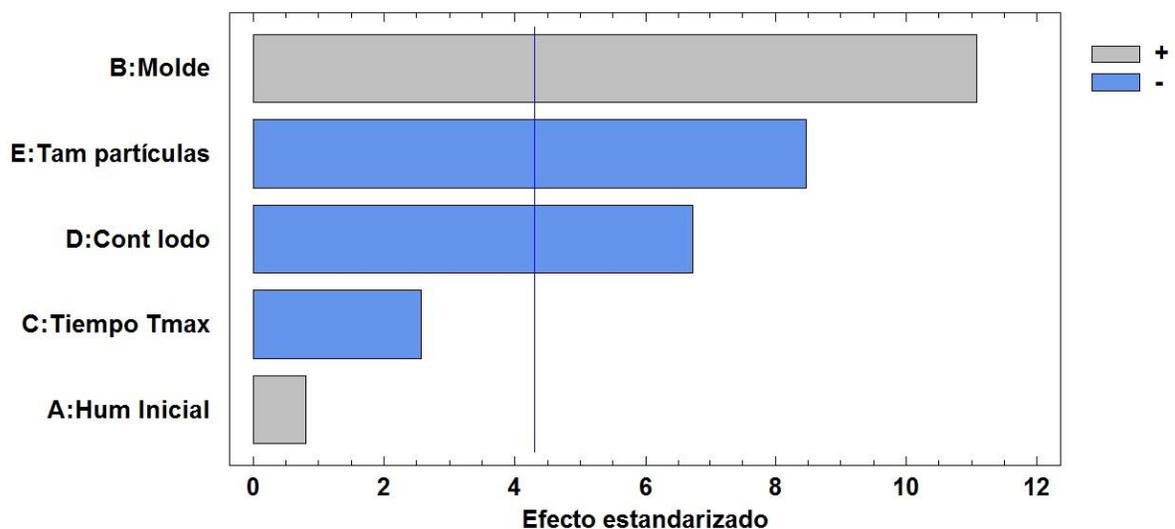


Figura 2.8. Influencia de los factores en la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos.

Nomenclatura: Tam partículas: tamaño de partículas; Cont lodo: contenido de lodo; Tiempo Tmax: tiempo a temperatura máxima; Hum Inicial: humedad inicial.

En el Anexo I se muestran los resultados del análisis de varianza y los gráficos de los errores obtenidos para cada propiedad.

### *2.3.2. Optimización del proceso de producción de vitrocerámicos.*

Los factores que tuvieron una influencia significativa en la resistencia a la compresión del material vitrocerámico, se analizaron con un mayor número de niveles, buscando aumentar la precisión estadística de las respuestas obtenidas.

Se empleó un diseño de superficie de respuesta con el objetivo de encontrar los niveles óptimos de las variables que permitan maximizar la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos, y de forma simultánea, minimizar la densidad del material. Los vitrocerámicos deben cumplir con las propiedades necesarias para su empleo como agregado grueso en concretos ligeros estructurales. Se marcaron como límite aceptable para ambas propiedades las que establecen las normativas consultadas para concretos ligeros. La densidad de un agregado, para ser considerado de peso ligero, debe ser inferior a los  $2,000 \text{ kg/m}^3$ . La resistencia a la compresión de un concreto ligero estructural debe cumplir con un valor mínimo de 17 MPa. Debido a que la matriz estructural del concreto está formada principalmente por los agregados gruesos, la resistencia a la compresión de estos no debe ser inferior a la deseada para el concreto, por tanto se tomó este valor (17 MPa) como límite inferior permisible para los vitrocerámicos.

#### *2.3.2.1. Diseño experimental*

En la Tabla 2.4 se identifican los niveles analizados para cada variable. Es necesario precisar que una de las variables que mostró un efecto significativo fue el empleo de un molde metálico durante la calcinación de la mezcla lodo-arcilla. Debido a que es una variable categórica, no es posible su análisis a diferentes niveles, por lo tanto, esta variable solo se utilizó en su nivel alto en el resto de los experimentos, el cual brinda los mejores valores de resistencia a la compresión, como se observa en la Figura 2.8.

## Capítulo II – Estudio experimental de la producción de vitrocerámicos

Tabla 2.4. Características de las variables continuas analizadas para la optimización de las propiedades de los vitrocerámicos.

Variable	Tipo	Número niveles	Niv. alto (+)	Niv. bajo (-)
Contenido lodo	continua	5	100	0
Tamaño de partículas	continua	4	0.59	0.150

El diseño propuesto con los diferentes niveles de variables se muestra en la Tabla 2.5. Para cada combinación se realizaron ensayos por duplicado, los resultados se muestran en el siguiente inciso. Todos los análisis estadísticos se realizaron para un nivel de confianza de 95%.

Tabla 2.5. Diseño de superficie de respuesta con los niveles de cada variable para la optimización de la producción de agregados vitrocerámicos.

Vitrocerámico	Contenido de lodo	Tamaño de partícula
A4	0	0.600
A1	0	0.150
B3	30	0.425
B2	30	0.300
B1	30	0.150
C3	50	0.425
C2	50	0.300
C1	50	0.150
D3	70	0.425
D2	70	0.300
D1	70	0.150
E4	100	0.600
E1	100	0.150

### 2.3.2.2. Resultados y discusión. Optimización del proceso de producción de vitrocerámicos.

Los resultados de densidad y resistencia a la compresión obtenidos para cada prueba del diseño de experimentos se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Resultados promedio de las propiedades evaluadas en los vitrocerámicos ( $n=2$ ).

Vitrocerámico	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Resistencia a la compresión (MPa)
A4	$1,565 \pm 222$	$14.9 \pm 4.9$
A1	$1,421 \pm 97$	$20.0 \pm 0.7$
B3	$1,112 \pm 51$	$6.0 \pm 0.8$
B2	$1,027 \pm 10$	$10.5 \pm 1.7$
B1	$1,172 \pm 84$	$19.6 \pm 2.4$
C3	$1,161 \pm 10$	$10.9 \pm 1.4$
C2	$1,257 \pm 21$	$13.5 \pm 0.7$
C1	$1,396 \pm 41$	$25.8 \pm 3.2$
D3	$1,085 \pm 32$	$3.2 \pm 0.2$
D2	$1,262 \pm 16$	$8.5 \pm 0.6$
D1	$1,293 \pm 66$	$8.0 \pm 0.5$
E4	$993 \pm 12$	$1.1 \pm 0.1$
E1	$1,052 \pm 37$	$2.0 \pm 0.2$

Analizando los resultados de la Tabla 2.6, se comprueba que todas las formulaciones de vitrocerámicos poseen valores de densidad inferiores a  $2,000 \text{ kg/m}^3$ , límite establecido para agregados ligeros. Sin embargo, solo tres de dichas formulaciones cumplen con el valor de resistencia a la compresión mínimo de 17 MPa, fijado en la normativa para concretos ligeros estructurales.

### 2.3.2.3. Análisis estadístico. Niveles óptimos de variables significativas

En la Figura 2.9 se muestran las variables consideradas en el diseño y la influencia de cada una sobre la densidad del material. Como se observa, la única variable que presenta una influencia significativa, sobre la densidad de los vitrocerámicos, es el contenido de lodo. El nivel óptimo para lograr la menor densidad, es el máximo valor de la variable, o sea, un 100% de contenido de lodo en la mezcla. El tamaño de partícula puede adoptar cualquier valor, dentro del intervalo evaluado, debido a que no tiene influencia sobre esta propiedad.

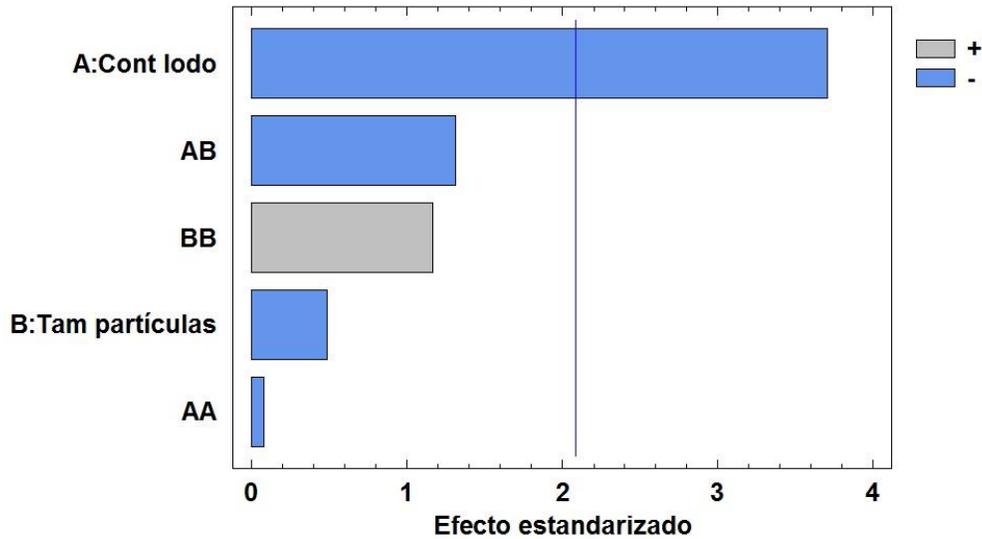


Figura 2.9. Diagrama de Pareto de las variables que presentan una influencia significativa sobre la densidad de los vitrocerámicos. Nomenclatura: Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas.

En la Figura 2.10 se representa la superficie de respuesta generada dentro del espacio vectorial analizado. Se comprueba la baja influencia que presenta el tamaño de partícula ya que la pendiente de la superficie en la dirección del eje es cercana a cero.

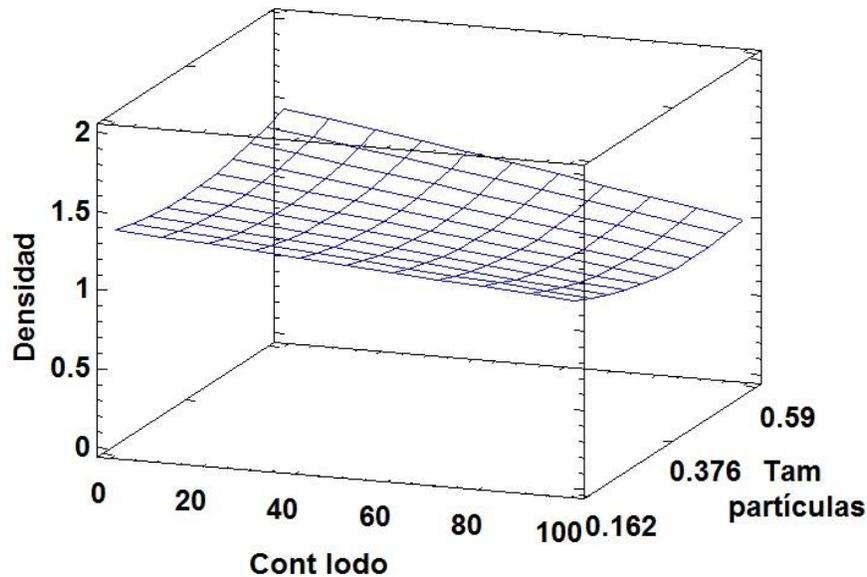


Figura 2.10. Superficie de respuesta de la densidad para diferentes niveles de variables. Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas.

Además de la densidad, es imprescindible obtener una resistencia a la compresión de los materiales mayor de 17 MPa. En la Figura 2.11 se muestra la superficie de respuesta de la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos obtenida para los diferentes valores de contenido de lodo y tamaño de partículas analizadas.

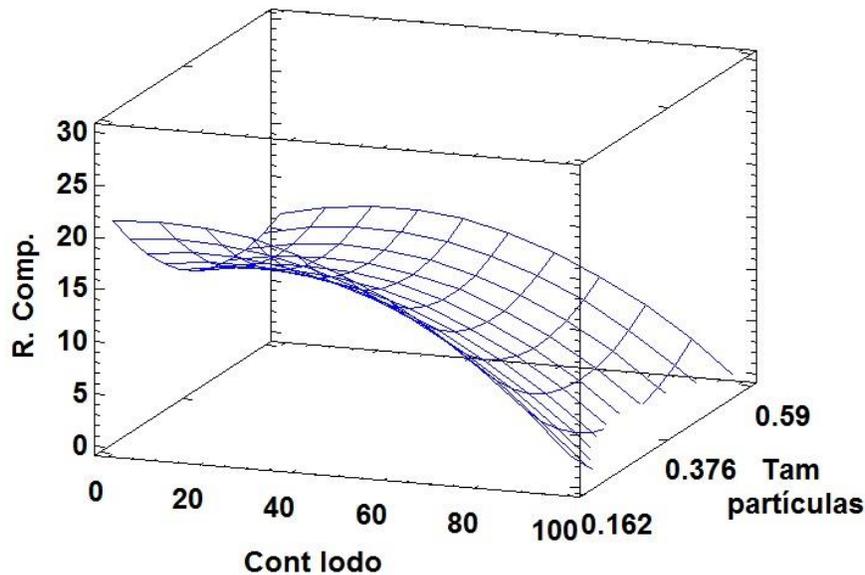


Figura 2.11. Superficie de respuesta para la resistencia a la compresión de los diferentes vitrocerámicos. Nomenclatura: R. Comp.: resistencia a la compresión; Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas.

Como se puede observar en la Figura 2.11, cuando se utiliza la fracción más fina de las materias primas (tamaño de partículas), se alcanzan los mejores desempeños de resistencia a la compresión de los vitrocerámicos. Además, para cada tamaño de partícula, los mejores valores se obtienen para contenidos de lodos menores del 50 %. Ambas variables fueron significativas, como se muestra en la Figura 2.12; por lo tanto, para la optimización de la resistencia a la compresión, se deben fijar los valores idóneos de ambas variables.

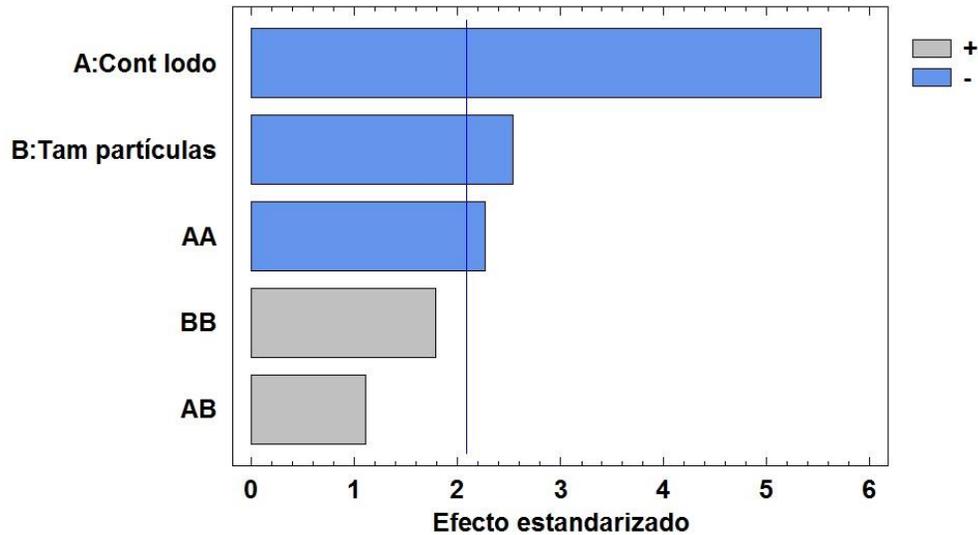


Figura 2.12. Diagrama de Pareto de las variables que presentan una influencia significativa sobre la resistencia a la compresión de los vitrocerámicos. Nomenclatura: Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas.

La Tabla 2.7 presenta el valor óptimo de las variables que se obtuvo como resultado de un análisis estadístico de los datos experimentales. El menor tamaño de partícula de los valores evaluados, como se observa en la Figura 2.11, es el que mostró el mejor desempeño. Para este tamaño de partícula, el modelo ofrece como valor óptimo de contenido de lodo un valor intermedio entre el cero y el 30%.

Tabla 2.7. Nivel óptimo de las variables significativas continuas analizadas en el diseño para maximizar la resistencia a la compresión.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo*
Contenido de lodo (%)	0	100	11.9
Tamaño de partícula (mm)	0.150	0.600	0.150

\*Valor óptimo de resistencia a la compresión: 21.7 MPa

De acuerdo con los resultados obtenidos, el valor más bajo de los evaluados para el tamaño de partícula de las materias primas estudiadas, fue el mejor para obtener las propiedades deseadas del vitrocerámico (máximo valor de resistencia a la compresión y valor mínimo de densidad). Para seleccionar el contenido óptimo de lodos es necesario tener en cuenta varios factores. Según el modelo, un 12% de contenido de lodo proporcionará los mejores

desempeños de resistencia a la compresión; sin embargo, los menores valores de densidad se alcanzaron con una mezcla de 100% de lodos. Del análisis de los resultados de densidad se comprobó que para todas las formulaciones de vitrocerámicos, se obtuvieron valores de densidad menores a  $2,000 \text{ kg/m}^3$ , por lo tanto, todas cumplieron con la densidad requerida para considerarse como un agregado ligero para concreto, independientemente de que los menores valores fueran para un contenido máximo de lodos. Para la resistencia a la compresión, por el contrario, únicamente se obtuvieron valores superiores a los normados para un máximo de un 50% de contenido de lodo utilizando el menor tamaño de partícula (0.150 mm).

Para las dos propiedades analizadas, el contenido de lodo debería ser fijado por el valor óptimo que se obtiene para el mayor índice de resistencia a la compresión, ya que este valor cumple con la densidad requerida y ofrece el mejor valor de resistencia a la compresión. Sin embargo, a partir de estas dos propiedades también es posible realizar otro análisis, con el fin de obtener un valor optimizado más preciso de las variables, según los rendimientos buscados. Debido a que el objetivo de este trabajo es la obtención de un material que posea una elevada resistencia a la compresión y, que al mismo tiempo, presente una baja densidad, se propuso utilizar un resultado ponderado, calculado con base en esas dos propiedades.

Ramírez et al. [83] emplearon la resistencia relativa, obtenida a partir de dividir la resistencia a la compresión de un material entre su densidad. Para el presente trabajo, resultaría adecuado emplear esta propiedad para determinar los valores óptimos de las variables, debido a que se obtiene un resultado ponderado que involucra las dos propiedades analizadas inicialmente.

En la Figura 2.13 se muestra la superficie de respuesta que se obtiene para la resistencia relativa de los vitrocerámicos analizados. La resistencia relativa, tiene las unidades Nm/g, acorde a lo indicado por Ramírez et al. [83]. Como se observa, el comportamiento es similar al obtenido para la resistencia a la compresión.

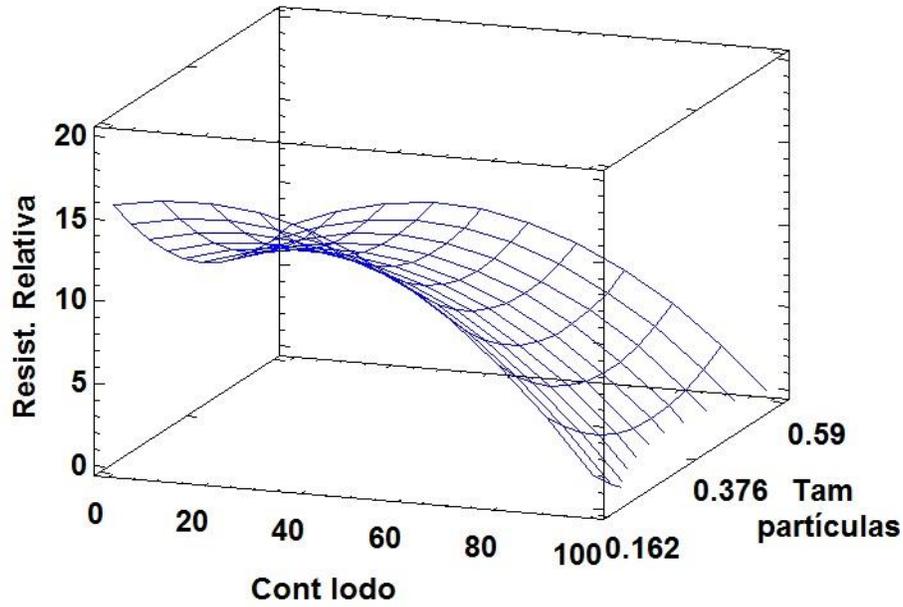


Figura 2.13. Superficie de respuesta para la resistencia relativa de los diferentes vitrocerámicos. Nomenclatura: Resist. Relativa.: resistencia relativa; Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas.

De manera similar a lo que ocurre para la resistencia a la compresión, las dos variables analizadas fueron significativas (Figura 2.14), aunque para este caso los valores de significancia fueron mayores, si se comparan con los obtenidos para la resistencia a la compresión.

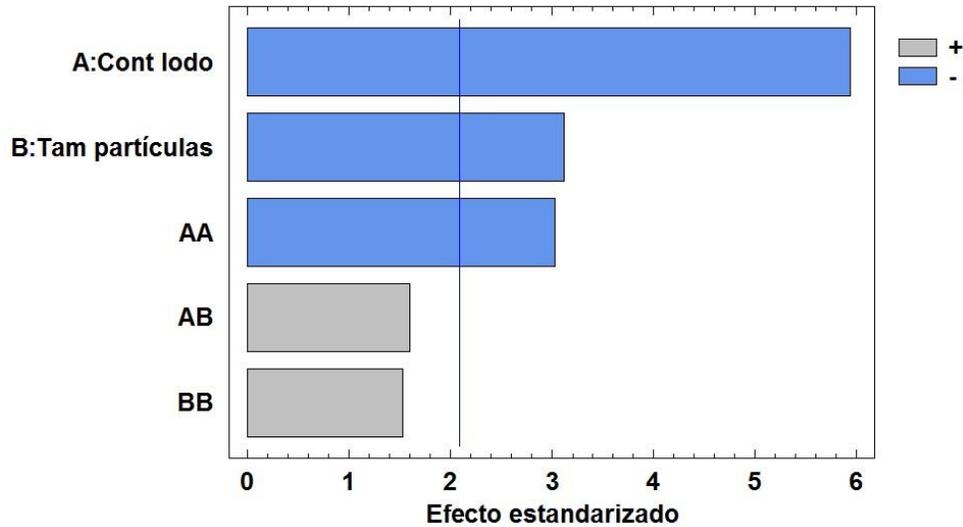


Figura 2.14. Diagrama de Pareto de las variables analizadas para la resistencia relativa de los vitrocerámicos. Nomenclatura: Cont lodo: contenido de lodo; Tam partículas: tamaño de partículas.

Los valores óptimos de las variables para esta propiedad se muestran en la Tabla 2.8. Los resultados, como era de esperar, son similares a los obtenidos para la resistencia a la compresión, pero en este caso el valor óptimo de contenido de lodo se incrementó hasta 17%.

Tabla 2.8. Nivel óptimo de las variables significativas continuas analizadas en el diseño para maximizar la resistencia relativa.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Cont lodo (%)	0	100	17.2
Tam partículas (mm)	0.150	0.600	0.150

No obstante a estos resultados, para seleccionar el valor definitivo a emplear para cada variable, se deben tomar en consideración, además de la factibilidad técnica, otros factores, como la factibilidad ambiental del material a producir. Incluir solo un 17% de residuo, en la formulación de los agregados vitrocerámicos, no brindaría las mejores oportunidades, ya que una sustitución pequeña de material natural por reciclado y teniendo en cuenta el proceso productivo, no solo no representa un gran impacto ambiental, sino que además, no se obtendrían los mejores resultados económicos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, emplear contenidos de lodo entre 30% y 50%, sería más acertado. Considerando las gráficas de superficie de repuesta de la densidad y la resistencia a la compresión (Figuras 2.10 y 2.11 respectivamente), se comprueba que es una opción viable técnicamente, siempre que se utilice el menor tamaño de partícula de las materias primas. El material desarrollado puede presentar pérdidas de desempeño mecánico, comparado con la formulación óptima de 17% de contenido de lodo, pero a cambio se estaría incrementando, para el caso del 50%, hasta tres veces el contenido de material residual empleado. Si las pérdidas en desempeños mecánicos no son de una magnitud tal que comprometa su uso como agregado, se deben asumir, teniendo en cuenta el incremento considerable de incorporación de material residual y los beneficios ambientales y económicos que esto puede representar.

En el Anexo II se muestran los resultados del análisis de varianza y los gráficos de los errores obtenidos para cada uno de los modelos empleados.

#### 2.3.2.4. Valores óptimos de las variables significativas del proceso de producción de vitrocerámicos

Teniendo en cuenta los resultados y consideraciones definidos en el inciso 2.3.2.3, se seleccionaron dos formulaciones de vitrocerámicos para la fabricación de los agregados ligeros empleados en la fabricación de concretos. Una formulación con 70-30 (porcentaje de arcilla y lodo respectivamente) y la otra con 50-50, esta proporción arcilla/lodo, es la única diferencia entre ambos materiales. En la Tabla 2.9 se muestran las condiciones de fabricación adoptadas para cada formulación. Es conveniente mencionar que únicamente existen variaciones en el contenido de lodo, el resto de los parámetros se mantuvo constante.

Tabla 2.9. Valores óptimos de las variables para la producción de vitrocerámicos a utilizar como agregados ligeros para la elaboración de concretos estructurales.

Variable	Nivel óptimo	
	Vitrocaramico 1	Vitrocaramico 2
Humedad inicial	Máxima	Máxima
Molde metálico	Sí	Sí
Tiempo a temperatura máxima (min)	25	25

Contenido de lodo (%)	30	50
Tamaño de partículas (mm)	0.150	0.150

El contenido de lodo, el tamaño de partículas y el uso de un molde metálico durante la calcinación, resultaron ser las variables significativas en el proceso. Por lo tanto, el nivel seleccionado para el resto de variables mostradas en la Tabla 2.9 puede ser cualquiera dentro del intervalo analizado en este trabajo. Como regla general, se debe seleccionar el nivel más factible técnica o económicamente, ya que contribuye a la mayor eficiencia del proceso de producción.

Para el presente estudio, utilizar la humedad inicial máxima es conveniente para el proceso de fabricación, debido a que evita introducir un paso intermedio para el secado de la pieza y ahorra energía; por lo tanto, ese fue el nivel seleccionado para esta variable. Con respecto al tiempo a temperatura máxima, lo más factible técnica y económicamente era seleccionar el menor de los tiempos analizados (10 minutos, Tabla 2.1), sin embargo, se optó por emplear 25 minutos. Esto se debe a que la rampa de calentamiento del horno empleado no siempre es igual y se corría el riesgo de quedar en ocasiones por debajo de los 10 minutos, de haber utilizado el tiempo mínimo de calcinación. Con el empleo de 25 minutos, hay más probabilidades de mantenerse siempre dentro del intervalo analizado en el diseño, debido a que esta variable resultó ser no significativa, estos cambios no tienen repercusión en las propiedades del vitrocerámico.

Es importante mencionar que las formulaciones seleccionadas corresponden a los vitrocerámicos denominados B1 y C1, según la nomenclatura utilizada en la optimización.

#### *2.3.2.5. Análisis químico de los vitrocerámicos*

En las Figuras 2.15, 2.16 y 2.17 se muestran los resultados del análisis de difracción de rayos X realizado a tres de los vitrocerámicos elaborados con la fracción fina de las materias primas (B1, C1 y D1 respectivamente). De estos vitrocerámicos, el B1 y el C1 fueron seleccionados para la producción de agregados, no obstante, se incluye en el análisis el D1 para comprobar las posibles variaciones existentes como resultado de los diferentes procesos de fabricación.

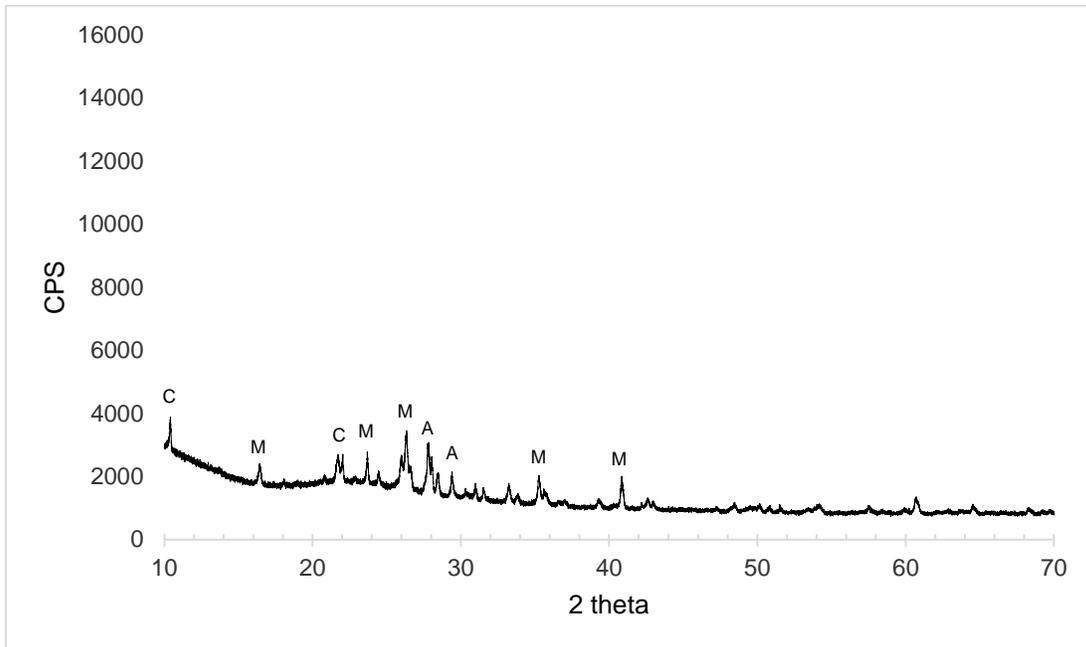


Figura 2.15. Difractograma de rayos X del vitrocerámico B1. A: albita, M: mullita, C: corderita.

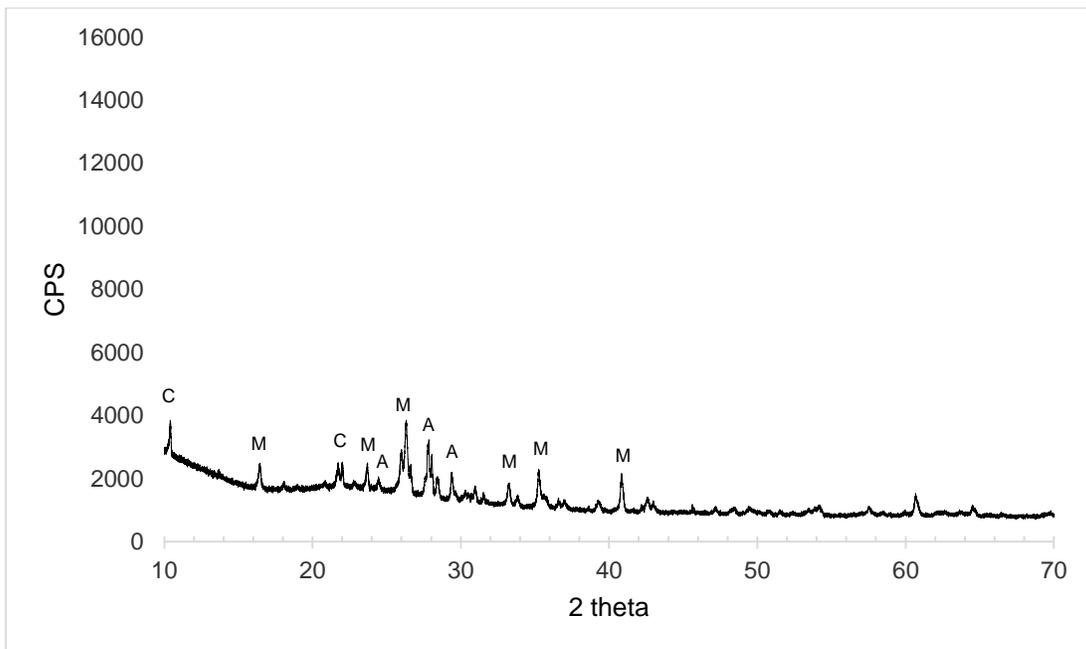


Figura 2.16. Difractograma de rayos X del vitrocerámico C1. A: albita, M: mullita, C: corderita.

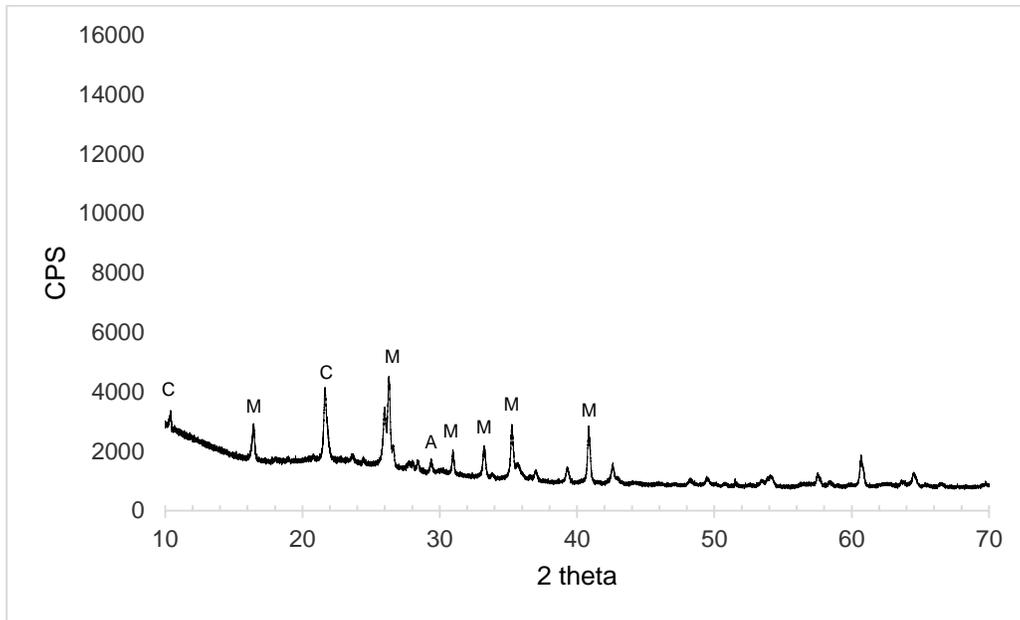
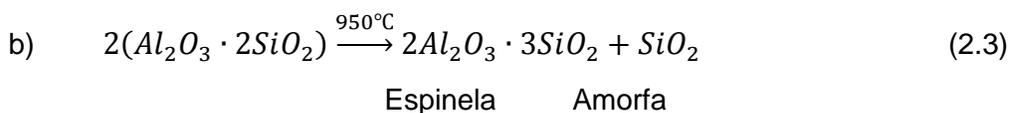
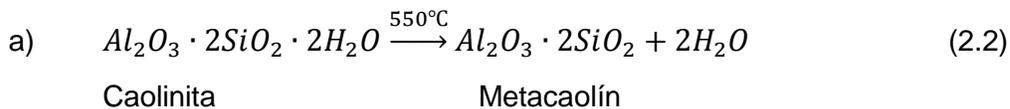
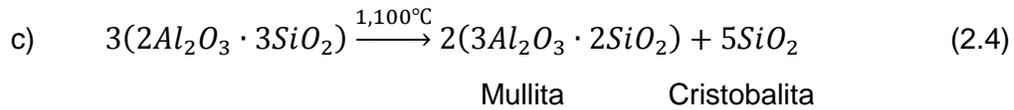


Figura 2.17. Difractograma de rayos X del vitrocerámico D1. A: albita, M: mullita, C: corderita.

En los vitrocerámicos mostrados en las Figuras 2.15, 2.16 y 2.17(B1, C1 y D1 respectivamente) se identificaron fases similares. La muestra D1, presenta las mayores diferencias, observándose un aumento en la intensidad de las señales de la mullita. Los vitrocerámicos B1, C1 y D1 fueron elaborados con la fracción fina de las materias primas y, si comparamos los resultados de DRX de estas materias primas con los obtenidos para los vitrocerámicos, se observa que la intensidad de las señales es más baja, debido a una mayor cantidad de estructura amorfa. En los vitrocerámicos, se detecta la presencia de albita, aunque en una proporción menor que en las materias primas (Figuras 2.1 y 2.3), y la aparición de mullita, que se forma como resultado de la transformación de la caolinita presente en las materias primas, a través de reacciones que se producen a altas temperaturas [84], [85]:





En el difractograma de los vitrocerámicos analizados también se observa la presencia de corderita. Según se muestra en la Figura 2.18, a temperaturas cercanas a las utilizadas en el presente trabajo y en sistemas con presencia de Si, Al y Mg, se forma este compuesto. El análisis de fluorescencia de rayos X de la arcilla y el lodo no se realizó en el presente trabajo, pero existen registros de trabajos anteriores [5], donde se emplearon materias primas similares a las del presente estudio, y se observa la presencia de magnesio y el resto de los materiales necesarios (Anexo III).

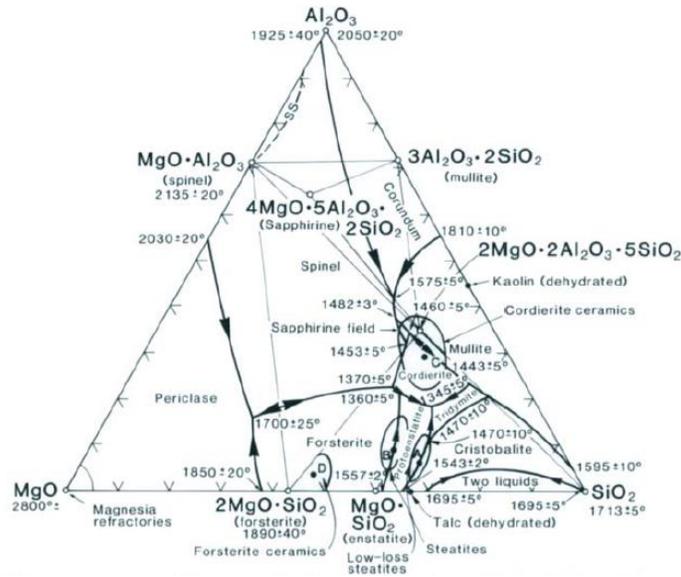


Figura 2.18. Sistema de fases ternario MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> [86].

### 3. Estudio experimental de la producción de concretos ligeros

#### 3.1. Introducción

El estudio experimental para la producción de concretos se estructuró en cinco etapas o actividades que se presentan en la Figura 3.1

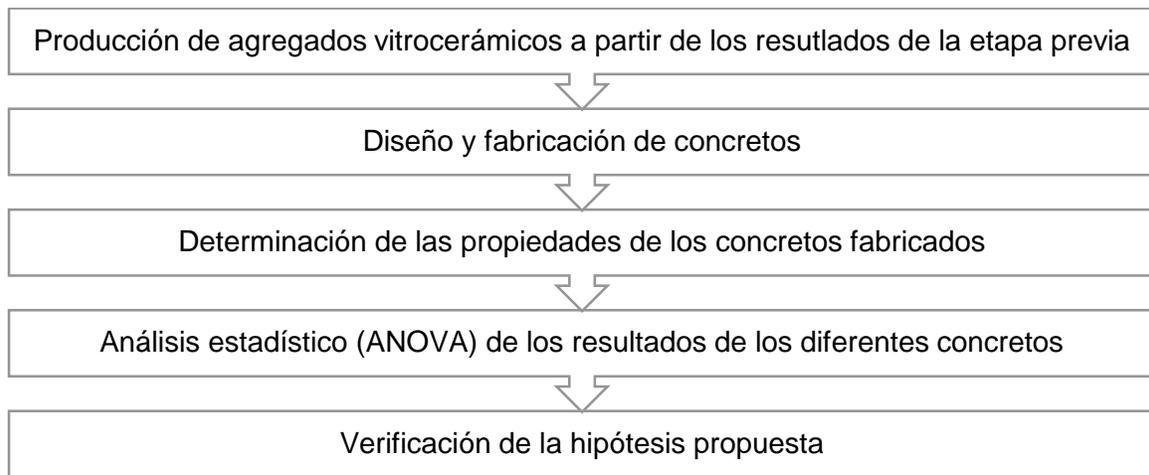


Figura 3.1. Etapas del estudio experimental de producción de concretos.

Para el estudio de los concretos, como primer paso, se fabricaron los agregados gruesos vitrocerámicos a partir de los resultados obtenidos en la fase previa. Además de los agregados vitrocerámicos, se utilizó un agregado natural de peso normal y un agregado natural de peso ligero. Manteniendo el resto de materiales iguales se diseñaron y fabricaron los diferentes concretos (a partir de cada uno de los diferentes agregados gruesos). Se analizaron tres propiedades de para cada tipo de concreto, una física (densidad), una mecánica (resistencia a la compresión) y una de durabilidad (absorción capilar). A través de un análisis estadístico se comprobó la existencia de diferencias significativas entre los valores de las propiedades de los diferentes concretos y con los resultados se verificó la hipótesis propuesta en el presente trabajo.

### 3.2. Producción de los agregados vitrocerámicos

Para la producción de los agregados ligeros utilizados en la formulación de concretos se emplearon los materiales vitrocerámicos fabricados aplicando los niveles o valores óptimos de las variables significativas que se estimaron en el capítulo anterior. Se produjeron dos tipos diferentes de agregados variando la proporción arcilla/lodo. El resto de las variables implicadas en la producción se mantuvieron constantes, según los valores que producían una maximización de la resistencia a la compresión al tiempo que arrojaban la menor densidad.

Los dos tipos de agregados seleccionados responden a las características que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de producción de los agregados reciclados.

Agregado vitrocerámico	Proporción de lodos (%)	Tamaño de partícula (mm)
GV	50	0.150
GV2	30	0.150

Del proceso de producción de vitrocerámicos se obtuvo un monolito aproximadamente cilíndrico, siendo la mayor dimensión de esta pieza aproximadamente de 9.5 cm. Para la fabricación del concreto, se empleó un agregado grueso de 19.1 mm como tamaño máximo de partícula. Por lo tanto, las piezas de vitrocerámico producidas se trituraron hasta alcanzar el tamaño máximo requerido. Para la trituración se empleó una trituradora de mandíbulas.

### 3.3. Propiedades de los materiales empleados en la producción de concreto

#### 3.3.1. Agregados gruesos

Se utilizaron cuatro agregados diferentes. Uno de origen natural y peso normal (GN), otro de origen natural y de peso ligero (GL) y por último los dos agregados vitrocerámicos (GV y GV2) descritos en el epígrafe 3.1.

En la Figura 3.2 se muestra la distribución granulométrica de estos agregados.

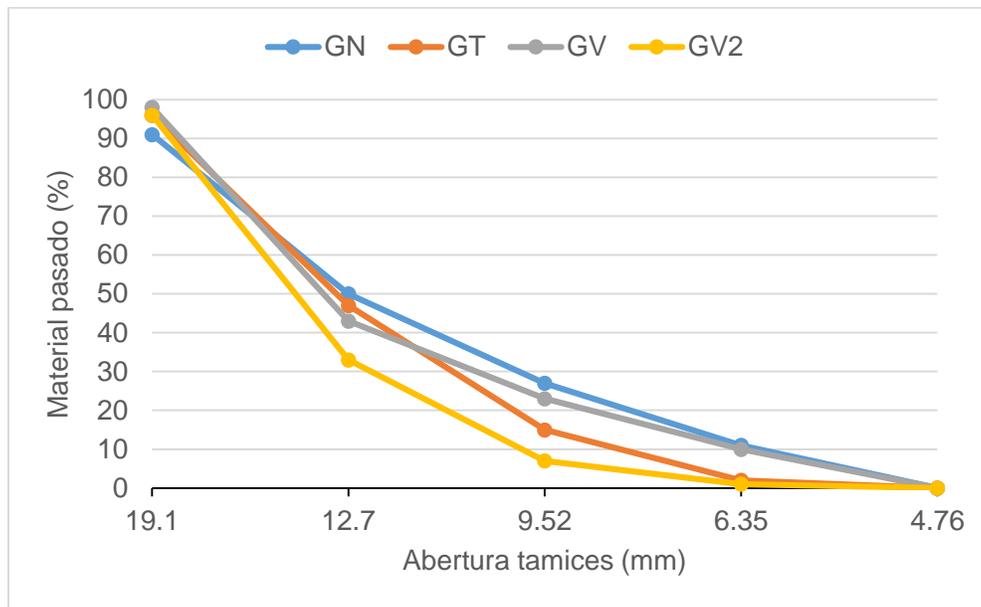


Figura 3.2. Distribución granulométrica de los agregados gruesos.

Los agregados presentaron una distribución granulométrica similar (Figura 3.2), siendo el agregado reciclado GV2 el que muestra las mayores diferencias. El proceso de trituración empleado fue igual para todos los agregados (con excepción del GN que no se trituró debido a que se obtuvo comercialmente con el tamaño máximo requerido en el estudio). La menor resistencia de este material (GV2) comparado con el GV (datos brindados en el Capítulo II del presente trabajo) puede ser la causa de este comportamiento, debido a que se produce una mayor trituración del material.

Las propiedades físicas de los agregados gruesos empleados en este trabajo se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Propiedades físicas de los agregados gruesos

Propiedad	GN	GT	GV	GV2	Método*
Densidad (kg/l)	2.65	1.82	1.51	1.23	ASTM C127
Absorción de agua (%)	1.17	9.57	12.75	9.62	
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1,305	785	676	594	ASTM C29 / 29M
Peso unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1,445	843	727	636	
% de huecos	45.5	53.5	52.0	48.5	

\*En el Anexo IV se describen cada uno de los métodos utilizados para la determinación de estas propiedades.

Los agregados reciclados presentan una densidad que permite clasificarlos como agregados ligeros. Tanto el agregado ligero natural como los agregados vitrocerámicos, presentan valores de densidad significativamente inferiores a los del agregado natural convencional GN. La absorción de estos tres agregados, como era de esperar, es mayor a la del agregado convencional. Comparando los dos agregados vitrocerámicos utilizados en el estudio, se observa que el GV2 presenta una densidad inferior al agregado GV, consecuente con lo obtenido en el estudio de optimización de la producción del material vitrocerámico. Sin embargo, el valor de absorción de agua de GV2 es inferior al de GV, esta característica es quizás consecuencia de los tamaños de poros, al ser mayores en el agregado GV2, se tiende a distorsionar el ensayo, debido a que el agua escapa rápidamente impidiendo la correcta lectura del peso saturado.

### 3.3.2. Agregado fino

Se utilizó una arena natural para todas las dosificaciones de concreto. La granulometría se muestra en la Figura 3.3 y las propiedades físicas en la Tabla 3.3.

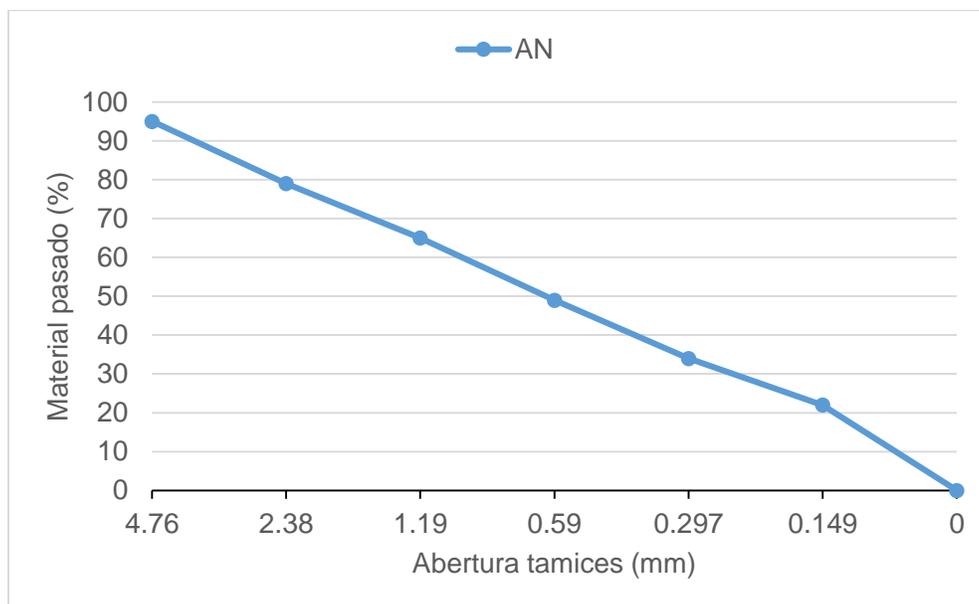


Figura 3.3. Distribución granulométrica del agregado fino.

Tabla 3.3. Propiedades físicas del agregado fino.

Propiedad	AN
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2,440
Absorción de agua (%)	1.35
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1,437
Peso unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1,637
Material más fino T-200 (%)	5
Módulo de finura	2.56

Las propiedades de la arena se consideran, de forma general, satisfactorias. Tanto la densidad como la absorción de agua están dentro del intervalo deseado para este tipo de material. No obstante, es necesario destacar que el porcentaje de material más fino que el tamiz número 200 es alto, con lo que se pueden comprometer las prestaciones del concreto.

### 3.3.3. *Cemento*

Se utilizó un cemento Portland CPC 30R con marca comercial Fortaleza. Este cemento tiene una resistencia a la compresión característica de 30 MPa a 28 días.

### 3.4. **Diseño de la mezcla de concreto**

Se diseñaron cuatro dosificaciones de concreto, una para un concreto de peso normal y las tres restantes para concretos ligeros. Para los concretos ligeros se varió el tipo de agregado ligero empleado en cada caso (un agregado ligero natural y dos agregados ligeros reciclados). Para el diseño de todos los concretos, además de los agregados gruesos seleccionados para cada caso, se empleó un cemento Portland comercial convencional, agua potable y un agregado fino de peso normal. En la Tabla 3.4 se muestran las características generales de cada concreto.

Tabla 3.4. Nomenclatura y composición general de los concretos fabricados.

Concreto	Agregado grueso	Características del agregado	Tipo de concreto
----------	-----------------	------------------------------	------------------

CCN	GN	Natural de peso normal	Estructural de peso normal
CLT	GT	Ligero de peso ligero	Ligero estructural
CRV	GV	Reciclado vitrocerámico con 50% de lodo	Ligero estructural
CRV2	GV2	Reciclado vitrocerámico con 30% de lodo	Ligero estructural

El concreto se diseñó para un desempeño estándar según publicaciones disponibles [6]. Las aplicaciones específicas de cada concreto dependen de varios factores, pero a partir de un diseño estándar como el propuesto en este trabajo, es posible alcanzar un número importantes de aplicaciones diferentes.

#### 3.4.1. Preparación de los concretos

Para la preparación de la mezcla del concreto de peso normal se utilizó el método propuesto por el *American Concrete Institute* (ACI 211.1-91) [87], y para los concretos ligeros se utilizó el ACI 211.2-98 [88]. Para los concretos ligeros se emplearon agregados gruesos ligeros y agregados finos de peso normal. Los pasos descritos en ambos métodos son similares, diferenciándose solo en el Paso 6. Los pasos recomendados por estos métodos y seguidos en el diseño se enlistan a continuación:

- 1) Seleccionar el asentamiento adecuado de la mezcla por el Cono de Abrams.
- 2) Seleccionar el tamaño máximo del agregado.
- 3) Estimar la cantidad de agua de mezclado y el contenido de aire de la mezcla.
- 4) Selección de la relación (másica) agua/cemento.
- 5) Determinación de la cantidad de cemento.
- 6) Estimación del contenido de agregados gruesos
- 7) Estimación del contenido de agregado fino.
- 8) Correcciones de la dosificación por humedad de los agregados.
- 9) Ajustes a la mezcla de prueba.

La descripción de cada uno de los pasos enlistados se expone a continuación:

- **Paso 1: Seleccionar el asentamiento adecuado de la mezcla por el Cono de Abrams**

El asentamiento de la mezcla debe estar especificado por el proyecto de la obra o el objeto de obra a construir. El ACI aporta una tabla de asentamientos por el cono recomendados, cuando se aplica vibración para la compactación del concreto (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Asentamientos recomendados para varios tipos de objetos de obra (Tabla 3.2.2.1 del ACI).

Tipo de construcción	Asentamiento en mm	
	Máximo	Mínimo
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25

El asentamiento se incrementa cuando se emplean aditivos químicos plastificantes o súper-plastificantes, que garantizan la misma relación agua/cemento y no provocan segregación o excesiva exudación.

Para el presente trabajo, se tuvo en cuenta el efecto de incorporación de un aditivo súper-plastificante, por lo que se seleccionó un valor bajo, además, la selección de un asentamiento elevado (cercano al máximo de la tabla), implica un aumento en el contenido de agua de la mezcla y como consecuencia el contenido de cemento aumenta igualmente.

Asentamiento seleccionado para todos los concretos: 25 mm

- **Paso 2: Seleccionar el tamaño máximo del agregado**

Para un mayor tamaño de agregado, siempre que estos posean una buena granulometría, se obtiene un menor porcentaje de huecos, por tanto, los concretos con agregados de mayor tamaño requieren una menor cantidad de mortero por unidad de volumen. No obstante, se debe tener en cuenta que la selección del TMN<sup>4</sup> está en función del elemento

---

<sup>4</sup> TMN: Tamaño máximo nominal del agregado grueso. Para las fracciones comerciales de los agregados, el TMN se define por los resultados del ensayo de granulometría, donde el valor del TMN es el tamiz inmediato superior al que retiene más del 15% en peso acumulado de la muestra analizada.

constructivo y la tecnología disponible para su construcción, mientras más pequeña sea la sección transversal o la cuantía de acero sea elevada, menor debe ser el TMN del agregado. Cumpliendo con estos criterios, generalmente se recomienda emplear el mayor TMN posible, debido a que se obtienen concretos más económicos por la reducción del contenido de cemento.

Para estudios experimentales, si no existen otras especificaciones, el tamaño del agregado generalmente se selecciona en función de las dimensiones del molde a emplear y de acuerdo a las fracciones comercializadas en la zona de actuación del estudio. El TMN del agregado grueso debe ser al menos 3 veces menor que la menor dimensión del molde seleccionado.

Para el presente trabajo se seleccionó un TMN de 19.1 mm, esta fracción es ampliamente comercializada y se emplea en varios de elementos constructivos. Para la fabricación del concreto se emplearán moldes cilíndricos de 100 mm x 200 mm, por lo tanto, se cumple con el criterio que relaciona el TMN y las dimensiones del molde.

Tamaño máximo del agregado utilizado para todos los concretos: ¾" (19.1 mm)

- **Paso 3: Estimar la cantidad de agua de mezclado y el contenido de aire de la mezcla**

La cantidad de agua requerida por unidad de volumen de concreto, para producir un determinado asentamiento por el cono de Abrams, depende del TMN del agregado, de la forma de las partículas y de la granulometría de los agregados, de la temperatura del concreto, de la cantidad de aire incorporado y del empleo o no de aditivos químicos.

En la Tabla 3.6 se indica un estimado de la cantidad de agua requerida para una mezcla de concreto en función del tamaño máximo de agregado y el asentamiento seleccionado:

Tabla 3.6. Cantidad de agua requerida para la mezcla de concreto (Tabla 3.2.2.2 del ACI)\*

Asentamiento en mm	Agua en kg/m <sup>3</sup> de concreto para los agregados de tamaño máximo nominal indicados en mm							
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
Concreto sin aire introducido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113

75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	-
% de aire atrapado sin aire introducido	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0,2

\*Información para concreto sin aire introducido.

Los asentamientos de la mezcla de concreto que sean superiores al intervalo de los 60 – 80 mm deben obtenerse con el empleo de aditivos súper-plastificantes. En ese caso, cuando se emplean aditivos químicos plastificantes o súper-plastificantes, se deberá tomar un asentamiento mínimo de 25 a 50 mm, para llevar el valor al asentamiento deseado una vez que se haya fabricado la mezcla, con el empleo de estos aditivos.

Cantidad de agua seleccionada: 190 kg/m<sup>3</sup>

- **Paso 4: Selección de la relación (másica) agua/cemento**

La relación agua/cemento (a/c) es un parámetro clave en la resistencia mecánica del concreto. El ACI recomienda diferentes valores de este parámetro (Tabla 3.7) en función de la resistencia a la compresión que se desee alcanzar en el concreto.

Tabla 3.7. Relaciones agua/cemento recomendadas para diferentes resistencias a compresión (Tabla 3.2.2.3(a) del ACI).

Resistencia a la compresión a 28 días en MPa	Relación (másica) agua/cemento	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

La resistencia a la compresión requerida para un concreto depende de su función estructural y las condiciones de exposición de dicho concreto. Para concretos ligeros, a

partir de 17 MPa, se consideran adecuados para ser utilizados con fines estructurales. En el presente estudio, se diseñó un concreto de 25 MPa, debido a que se desea probar un material nuevo y se optó por tener un margen con respecto al valor mínimo de 17 MPa.

Relación a/c para todos los concretos: 0.61

- **Paso 5. Determinación de la cantidad de cemento**

Una vez determinada la relación a/c y teniendo en cuenta la cantidad de agua (ya indicada anteriormente), se determina la cantidad de cemento necesaria para fabricar un metro cúbico de concreto.

$$C = \frac{A}{a/c} \quad (3.1)$$

C: Peso de cemento

A: Peso de agua para 1 m<sup>3</sup> de concreto.

a/c: Relación (másica) agua/cemento

Cantidad de cemento para todos los concretos: 311 kg/m<sup>3</sup>

- **Pasos 6 y 7: Estimación del contenido de agregados gruesos y finos a adicionar**

El ACI aporta un volumen aproximado de agregado grueso por unidad de volumen de concreto en función del TMN del agregado y del módulo de finura de la arena. Esta aproximación que brinda el ACI, ofrece buenos resultados cuando los agregados cumplen los requisitos normativos de forma (aproximadamente cúbica o redondeada) y granulometría y se emplean arenas cuyo módulo de finura no sobrepasa el valor de 3.00.

En este paso difieren las recomendaciones entre el diseño de un concreto de peso convencional y un concreto ligero, debido a que se realizan ajustes en los diferentes factores mostrados en la tabla por la diferencia de densidad de los agregados. En la Tabla 3.8 se muestran los valores recomendados por el ACI, para el diseño de concretos ligeros.

Capítulo III – Estudio experimental de la producción de concretos ligeros

Tabla 3.8. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto. (Tabla A1.5.3.6 del ACI)

Tamaño máximo nominal del agregado en plg - mm	Volumen del agregado grueso redondeado en estado seco en estufa hasta peso constante por unidad de volumen del concreto para diferentes módulos de finura del árido fino **			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8 – 9.62	0.58	0.56	0.54	0.52
1/2 – 12.5	0.67	0.65	0.63	0.61
3/4 – 19.1	0.74	0.72	0.70	0.68

\*\* Los volúmenes son seleccionados a partir de relaciones empíricas para producir concretos con un grado de trabajabilidad adecuado para las construcciones convencionales.

$$P = V_p \cdot PUC_p \text{ (kg)} \quad (3.2)$$

$V_p$ : Volumen de agregado grueso indicado en la tabla

$PUC_p$ : Peso unitario compactado del agregado grueso

Cantidad de agregado grueso:

$$CCN = 925 \text{ kg/m}^3$$

$$CLT = 607 \text{ kg/m}^3$$

$$CRV = 524 \text{ kg/m}^3$$

$$CRV2 = 458 \text{ kg/m}^3$$

Para la estimación de la cantidad de agregado fino, se utiliza la ecuación de la suma de volúmenes absolutos de los materiales para 1 metro cúbico (1000 litros):

$$\frac{P_c}{\gamma_c} + \frac{P_a}{\gamma_a} + \frac{P_g}{\gamma_g} = 1$$

$P_c$  : Peso de cemento en kg;

$\gamma_c$  : Peso específico del cemento (3.1 kg/dm<sup>3</sup> para el Cemento Portland Ordinario);

$P_a$  : Peso del agua (se considera igual al volumen pues su peso específico es 1.0 kg/dm<sup>3</sup>);

$P_g$  : Peso de cada tipo de agregado en kg;

$\gamma_g$  : Peso específico del agregado;

$\alpha$  : Contenido de aire en %

Cantidad de agregado fino:

$$\text{CCN} = 845 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{CLT} = 883 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{CRV} = 850 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{CRV2} = 789 \text{ kg/m}^3$$

- **Pasos 8 y 9: Ajustes de las dosificaciones por correcciones de la humedad de los agregados y por los resultados de la mezcla de prueba**

Estos últimos pasos de la metodología se realizan en el laboratorio en el momento de fabricar el concreto. El ajuste por humedad se hace a partir de la humedad que tengan los agregados antes de entrar en contacto con la pasta de cemento. El objetivo es respetar el diseño del concreto y no modificar la relación a/c por la influencia de los agregados (absorción de agua, humedad superficial).

En estos ajustes también es posible modificar la proporción de agregados gruesos en la mezcla. Si en el momento de la fabricación del concreto se aprecia que es necesario aumentar o disminuir la cantidad de arena, se realiza el ajuste y posteriormente se recalculan los valores de materiales para un metro cúbico.

*3.4.2. Dosificación obtenida*

En la Tabla 3.9 se muestra la cantidad de materiales necesarios para la fabricación de un metro cúbico de concreto, obtenida a partir del diseño detallado en el inciso 3.4.1.

Tabla 3.9. Proporciones de materiales utilizadas para cada mezcla de concreto.

Materiales	CCN	CLT	CRV	CRV2
Cemento (kg)	311	311	311	311
Agua (L)	190	190	190	190
Agregado G. (kg)	925	607	524	458
Agregado F. (kg)	845	883	850	789
Aditivo (%)	1.0	2.0	2.3	3.5

Se fabricaron 5 probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm para cada dosificación de concreto. Para todas las probetas se empleó el mismo método de compactación, realizado con 25 golpes con una varilla tipo, distribuidos en toda el área en dos capas. Las probetas se desmoldaron a las 24 horas y se introdujeron en un cuarto de curado con ambiente saturado hasta la edad de ensayo.

### 3.5. Caracterización de los concretos producidos

Se determinaron tres propiedades del concreto en estado endurecido, estas propiedades son: densidad, resistencia a la compresión y absorción de agua por capilaridad. En la Tabla 3.10 se muestran los procedimientos utilizados para la medición de cada propiedad.

Tabla 3.10. Técnicas de ensayo a utilizar para cada propiedad.

Propiedad a evaluar	Norma de ensayo
Densidad	ASTM C138/C138M-14
Resistencia a la compresión	ASTM C 495-99a
Absorción de agua por capilaridad	ASTM C 1585 - 04

En el Anexo IV se describe cada una de las técnicas de ensayo utilizadas y la forma de cálculo y expresión de los resultados de cada propiedad.

### 3.6. Resultados y discusión

#### 3.6.1. Densidad

La densidad de los diferentes tipos de concreto estudiados se muestra en la Figura 3.4.

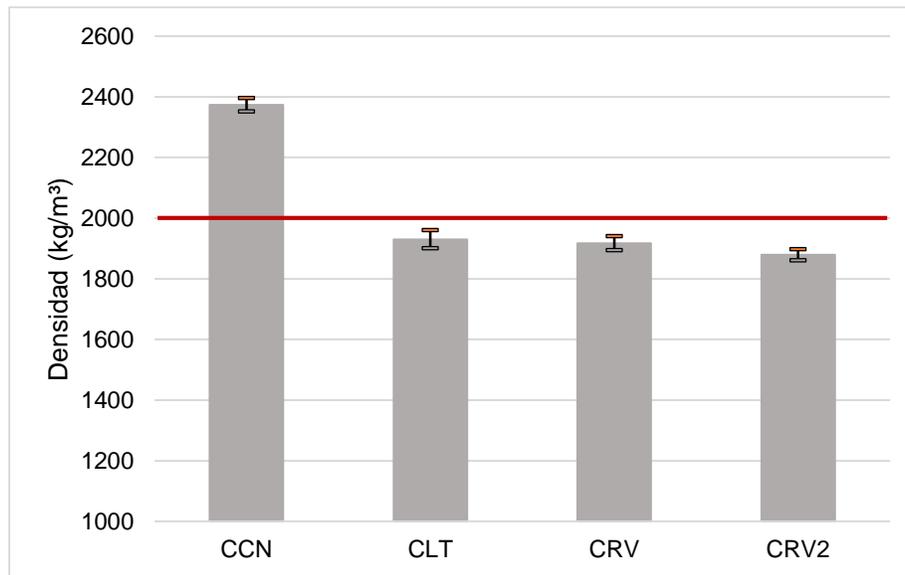


Figura 3.4. Valor medio y desviación estándar de la densidad a 28 días de los concretos analizados.

Los concretos fabricados con los agregados ligeros muestran una densidad menor de 2,000 kg/m<sup>3</sup>, límite superior (línea roja) de densidad, que permite clasificarlos como concretos ligeros. En la Figura 3.4 se aprecia la diferencia existente entre estos concretos y el concreto de agregados de peso normal. Teniendo en cuenta que el resto de los materiales utilizados en la fabricación de los diferentes concretos son iguales, dicha diferencia se puede atribuir completamente a la sustitución del agregado GN por cada uno de los agregados ligeros.

El concreto CRV2, elaborado con el agregado vitrocerámico con 30% de lodo, presenta los valores de densidad más bajos, como era de esperar, al ser el agregado GV2 el de menor densidad. Además, la buena distribución granulométrica de los agregados es importante para alcanzar estos resultados [6]. Una buena distribución de partículas permite la disminución de los espacios inter-granulares que luego deben ser ocupados por el mortero de cemento (de mayor densidad), mientras mayor sean los huecos, mayor será el contenido de mortero a emplear y por tanto la densidad se incrementará. Como se mostró en la Tabla

3.2, el agregado GV2, presentó el menor porcentaje de huecos entre los agregados ligeros contribuyendo a los bajos valores de densidad presentados.

La densidad reportada en otros estudios para concretos similares muestra valores muy variables, pues está en función de las características del diseño de cada concreto. Para concretos de mayores resistencias mecánicas, los valores de densidad tienden a aumentar, debido a la necesidad de mayores contenidos de pasta en la mezcla [89], por el contrario, cuando no se buscan funciones estructurales, la densidad puede descender hasta valores ligeramente superiores a  $1,400 \text{ kg/m}^3$  [48].

Entre los concretos ligeros de agregados vitrocerámicos (CRV y CRV2) y el concreto ligero de agregado natural (CLT), no parecen existir diferencias significativas. En todo caso, como se aprecia en la Figura 3.4, la densidad de los concretos de agregados vitrocerámicos resulta ser ligeramente inferior. Por lo tanto, se puede afirmar que la sustitución del agregado natural de tezontle por agregados vitrocerámicos, no influye negativamente en la densidad del concreto ligero, esto es, que la densidad no aumenta cuando se produce la sustitución. No obstante, en el inciso 3.7 del presente capítulo, se presenta un análisis estadístico de estos valores, donde se comprobaron matemáticamente los supuestos aquí planteados.

### 3.6.2. Resistencia a la compresión

En la Figura 3.5 se muestra el valor medio y la desviación estándar de la resistencia a la compresión de cada concreto. Se observa que el valor medio de todos los concretos ligeros sobrepasó el valor mínimo requerido de 17 MPa, límite mínimo de resistencia a la compresión (línea roja), que permite clasificar al material como concreto ligero estructural. Con respecto al concreto de peso normal, los concretos ligeros presentaron disminuciones de resistencia, pero nunca mayores de un 15%, como se muestra en la Tabla 3.11. Estas caídas de resistencia se han encontrado en otros estudios, aunque son más pronunciadas para concretos de mayores resistencias mecánicas [89]–[91]. Para concretos estructurales de bajas resistencias mecánicas, la matriz cementante es el factor crítico que determina la resistencia a la compresión del concreto. Para este caso, los diseños de los concretos fueron similares, por lo tanto, se podría esperar que la resistencia a la compresión de todos los concretos fuera similar, como finalmente ocurrió.

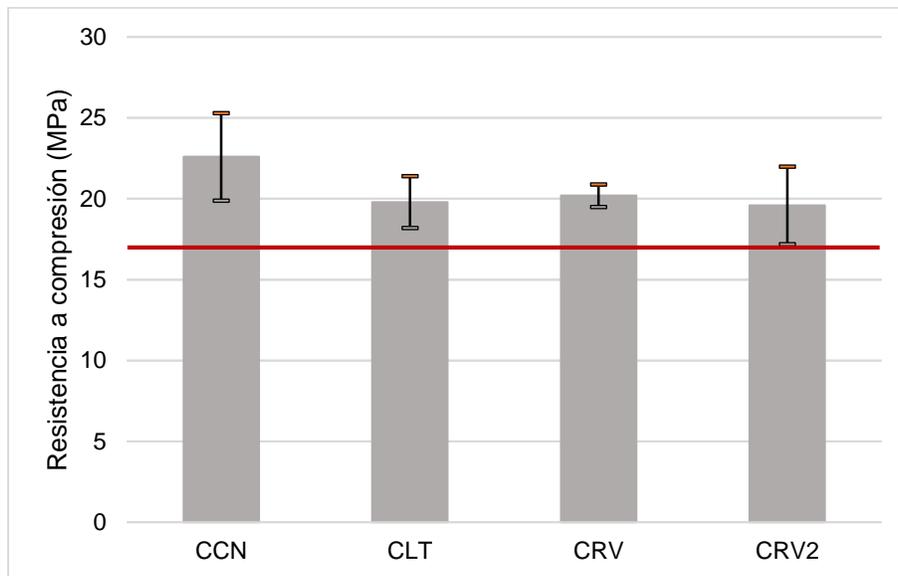


Figura 3.5. Valor medio y desviación estándar de la resistencia a la compresión a 28 días de los concretos analizados.

La relación a/c utilizada para los concretos fue elevada, debido a que solo se buscaba sobrepasar el valor mínimo de resistencia a la compresión exigido para fines estructurales que establece el ACI 213R-03. Esto tiene como ventaja la producción de un concreto económico, debido a que esta elevada cantidad de agua favorece la trabajabilidad de la mezcla con el empleo de una baja cantidad de cemento. Como desventaja se tiene que el concreto presenta bajas prestaciones mecánicas, pero depende del uso que vaya a tener el material la elección del diseño correcto [3]. Modificando el diseño de la mezcla es posible obtener mejores índices en la trabajabilidad, a través de la disminución de relación a/c, la introducción de mayores cantidades de aditivo y un aumento del contenido de cemento que permita obtener una trabajabilidad adecuada [6], [7].

Para diseños de mayores prestaciones mecánicas, los agregados pueden ser el factor determinante, siempre que la matriz cementante alcance mayor resistencia que la propia de los agregados. La resistencia de los agregados dentro del concreto es mayor a la que se obtiene en las pruebas de compresión del propio material [6], esto se debe a la menor esbeltez que posee el material cuando adquiere la forma granular del agregado y también a que queda confinado dentro de la matriz cementante. Teniendo en cuenta este factor, para los agregados producidos en este estudio, debe existir la posibilidad de producir

concretos de mayores valores de resistencia a la compresión, siempre que se ajuste el diseño para esos fines.

Se debe destacar que existen trabajos donde no se ha podido producir concretos estructurales empleando agregados fabricados a partir de lodos de plantas de tratamiento de agua, debido principalmente a las deficientes propiedades mecánicas del agregado [48], [92]. En esos estudios, las condiciones de diseño del concreto fueron similares a las del presente trabajo, por lo tanto, los resultados mecánicos de los concretos obtenidos en este estudio se pueden considerar relevantes.

En el inciso 3.7 del presente capítulo se realizará el procesamiento estadístico de los resultados de resistencia mecánica a la compresión de los concretos, con el objetivo de comprobar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre ellos y en función de estos resultados, aceptar o rechazar la hipótesis planteada en el trabajo.

### 3.6.3. Resistencia relativa

Resulta un tanto complejo evaluar los diferentes concretos a partir de la densidad y la resistencia a la compresión. Esto se debe al interés de maximizar la resistencia al tiempo que se minimiza la densidad, al ser propiedades diferentes y generalmente proporcionales, el concreto con mayor resistencia difícilmente coincide con el que presenta la menor densidad.

Teniendo en cuenta estos aspectos, de forma similar a lo realizado con los vitrocerámicos, se utilizó la resistencia relativa, con el objetivo de tener un parámetro cuantitativo que permita comparar los diferentes tipos de concreto.

En la Tabla 3.11 se muestran los valores de esta propiedad para cada concreto, además, se señalan las disminuciones de densidad y resistencia a la compresión encontradas para cada concreto ligero con respecto al concreto convencional.

Tabla 3.11. Parámetros físicos y mecánicos de los concretos producidos en este trabajo.

Concreto	Pérdida densidad (%)*	Pérdida resistencia (%)*	Resistencia relativa (Nm/g)
CCN	-	-	9.5
CLT	18.7	12.7	10.2
CRV	19.3	10.6	10.5

CRV2	20.9	13.1	10.4
------	------	------	------

\*Para el cálculo de estos factores se tomó como base el valor del concreto convencional, calculándose cuánto menor era la densidad y la resistencia en cada caso.

Los resultados de la resistencia relativa muestran valores similares para los tres concretos ligeros. Los valores más bajos de resistencia a la compresión se compensan con una menor densidad de los concretos y viceversa, lo que provoca que los valores de resistencia relativa sean prácticamente iguales para los tres concretos ligeros.

En la Tabla 3.11 se aprecia que las pérdidas de resistencia de los concretos ligeros, con respecto al concreto convencional, son menores que la disminución de la densidad alcanzada por el mismo material. En el caso del concreto CRV, esta diferencia es casi el doble, lo que es un índice prometedor, toda vez que se reduce el peso muerto que tendrá la estructura a un ritmo dos veces mayor de lo que el material pierde su capacidad de carga. Es importante tener en cuenta que para estructuras de concreto el peso muerto del propio material representa más del 50% de la carga total.

#### 3.6.4. Absorción capilar

En la Figura 3.6 se muestra el comportamiento de la absorción capilar de agua para los diferentes concretos. La medición de esta propiedad se realizó por un período de ocho días.

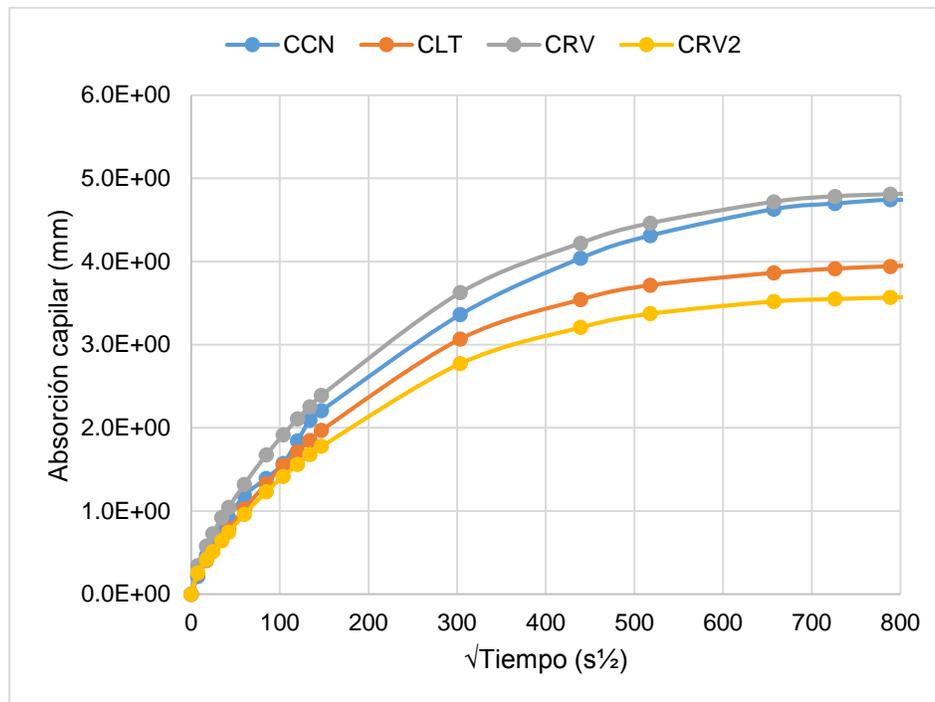


Figura 3.6. Curvas de absorción capilar de los concretos analizados.

El concreto de agregado natural convencional mostró valores de absorción capilar similares a los de los concretos ligeros. Este resultado contradice algunos de los datos hallados en estudios previos, en los que los concretos de agregados ligeros presentaron, como tendencia general, mayores valores de capilaridad [90], [93]. No obstante, en los estudios citados se utilizaban relaciones a/c menores que las empleadas en este estudio. Para relaciones a/c similares a las del presente trabajo (0.6), se han encontrado índices de absorción capilar para concretos convencionales similares a los alcanzados en este estudio [94].

La elevada relación a/c empleada en la fabricación de los concretos influye en que no se aprecien diferencias entre el concreto convencional y los de peso ligero. El aumento de este factor se ha comprobado que eleva significativamente los índices de absorción capilar de los concretos., con esto también se eleva la dispersión de los resultados y que factores no controlados influyan en el proceso, como puede ser el caso del control de la relación a/c en la mezcla de concreto, a partir de la absorción y la cantidad de agua presente en los agregados.

Debido al carácter heterogéneo del concreto, las curvas de absorción capilar muestran una transición suave entre el estado inicial y el final. Para el caso de la absorción capilar de

agua, solo se debe tener en cuenta el estado inicial, ya que con el transcurso del tiempo comienzan a llenarse de forma gradual los poros vacíos presentes tanto en la pasta como en los agregados del concreto, debido a un proceso de disolución-difusión de aire. Este proceso solamente es de interés cuando se desea evaluar la resistencia a la congelación del concreto y, por lo tanto, no se tendrá en cuenta en el presente estudio.

En la Figura 3.7 se muestra el ajuste lineal para las primeras 6 h de las curvas de absorción capilar, según lo recomendado en la ASTM 1585-04 [95]. El coeficiente de correlación obtenido para cada caso cumple con el requisito establecido por la normativa (igual o mayor de 0.98), lo que permite determinar la velocidad de absorción inicial de cada concreto.

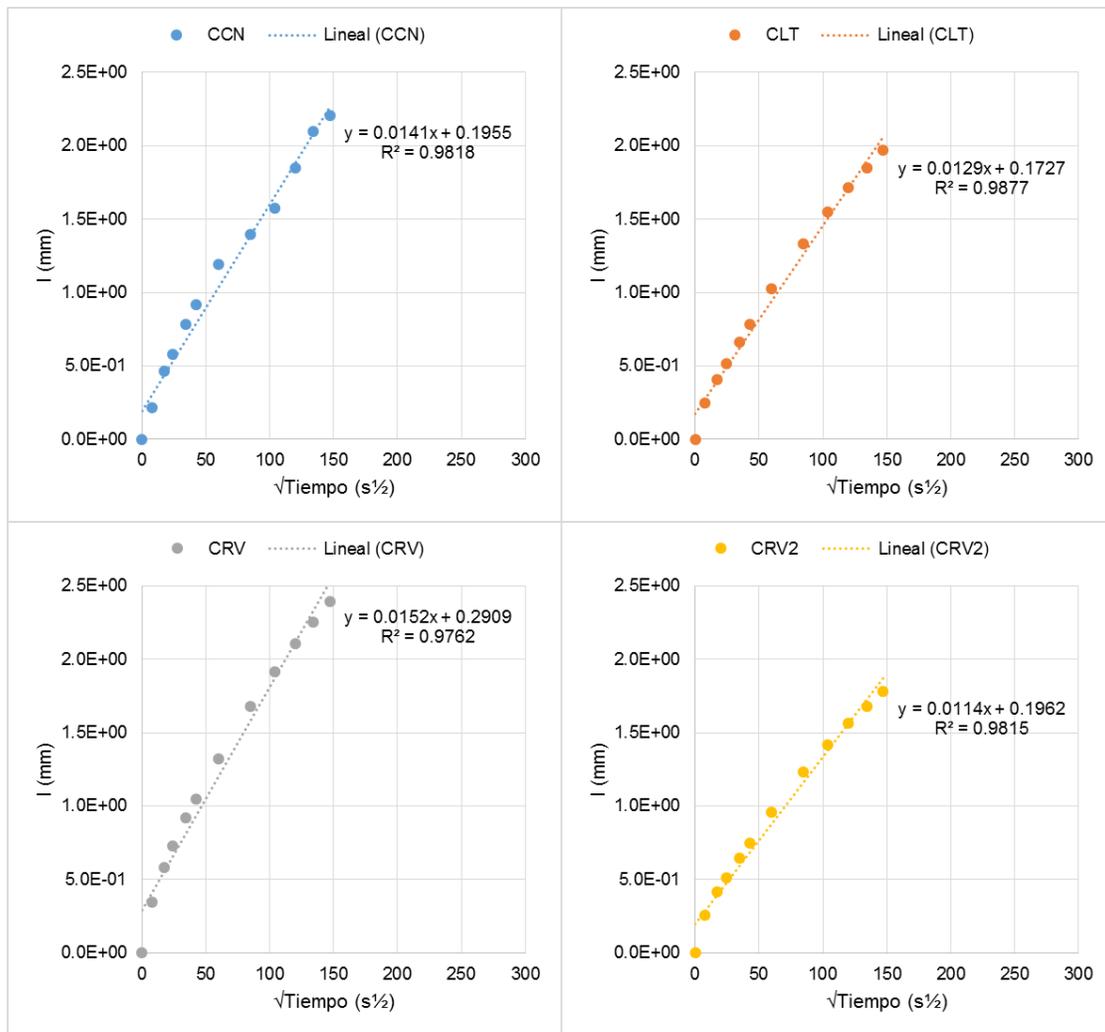


Figura 3.7. Regresión lineal de los puntos iniciales (6h) de la curva de absorción capilar para cada uno de los concretos analizados en el trabajo.

Los valores de sorptividad (velocidad de absorción capilar) de los diferentes concretos confirman las tendencias mostradas en la Figura 3.7. La velocidad inicial de absorción capilar depende únicamente de la red de poros capilares presente en la matriz cementante del concreto, a diferencia de las curvas de la Figura 3.6, donde a partir de cierto tiempo comienza a influir la absorción de los agregados y otros poros inertes. Para este estudio los diseños fueron similares, por lo que era de esperar que los comportamientos de todos los concretos tuvieran valores de sorptividad sin diferencias marcadas. Las diferencias encontradas, deben ser consecuencia de errores aleatorios debido fundamentalmente a la alta relación  $a/c$ .

En el inciso 3.7 del presente capítulo se analizan estadísticamente los valores reportados, con el fin de comprobar la hipótesis sobre la ausencia de diferencias significativas entre los diferentes concretos.

De manera general, los valores de sorptividad de los concretos analizados en este estudio son elevados en comparación con otros estudios [90], [93]. Esto se debe al diseño seleccionado, en el presente estudio se buscaba cumplir con los requisitos mínimos de resistencia a la compresión para concretos ligeros estructurales establecidos en el ACI 213R-03 [8], y por lo tanto, la relación  $a/c$  utilizada fue elevada y el contenido de cemento se mantuvo bajo. Esto da origen a un concreto económico, pero las prestaciones no son elevadas y su uso se debe restringir a elementos que no estén sometidos a ambientes de elevada agresividad<sup>5</sup>.

### 3.7. Análisis estadístico de los resultados

Para determinar la existencia o no de diferencias significativas entre las diferentes propiedades de los concretos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con los resultados obtenidos. Se seleccionó una propiedad física (densidad), una mecánica (resistencia a la compresión) y, por último, una que caracteriza la durabilidad del concreto (absorción capilar). Estas tres propiedades son utilizadas regularmente para caracterizar diferentes tipos de concretos y tanto la densidad como la resistencia a la compresión son básicas para

---

<sup>5</sup> La agresividad de los diferentes ambientes en los que pueden encontrarse las estructuras de concreto se divide generalmente en 5 niveles [98].

el presente estudio. En la Tabla 3.12 se ofrecen los valores promedio y desviación estándar de las propiedades utilizadas para el análisis.

Tabla 3.12. Valor promedio y desviación de las propiedades analizadas estadísticamente mediante el análisis de varianza.

Concreto	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	R. compresión (MPa)	Sorptividad (mm/s <sup>1/2</sup> )
CCN	2374 ± 22	22.6 ± 2.7	0.0149 ± 0.0011
CLT	1930 ± 30	19.7 ± 1.6	0.0129 ± 0.0019
CRV	1917 ± 23	20.2 ± 0.7	0.0152 ± 0.0005
CRV2	1879 ± 18	19.6 ± 2.4	0.0114 ± 0.0013

\*Nomenclatura: R. compresión: Resistencia a la compresión; Val. medio: Valor medio; Desv. est.: Desviación estándar

En las Tabla 3.13, 3.14 y 3.15 se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico para las propiedades de densidad, resistencia a la compresión y sorptividad respectivamente.

Para la prueba de análisis de varianza se plantearon las siguientes hipótesis:

$H_0$ : todos los tratamientos son iguales

$H_1$ : al menos uno de los tratamientos es diferente

Tabla 3.13. Resultados del ANOVA para los valores de densidad de los concretos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p*
Entre grupos	492306.67	3	164102.22	296.66	<b>1.55E-08</b>
Intra grupos	4465.33	8	553.17	-	-
Total	496732	11	-	-	-

\* En negritas se destaca el valor-p menor de 0.05, que indica la existencia de diferencias significativas.

Tabla 3.14. Resultados del ANOVA para los valores de resistencia a la compresión de los concretos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
---------------------------	-------------------	----	----------------	---------	---------

Entre grupos	17.4958	3	5.8319	1.50	0.2872
Intra grupos	31.1333	8	3.8917	-	-
Total	48.6292	11	-	-	-

Tabla 3.15. Resultados del ANOVA para los valores de sorptividad de los concretos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos	1.8724E-05	3	6.2413E-06	3.76	0.1165
Intra grupos	6.6350E-06	4	1.6588E-06	-	-
Total	2.5359E-05	7	-	-	-

En la Tabla 3.13, se observa que el valor-p asociado al ANOVA para la densidad, con un nivel de confianza de 95%, resultó ser menor de 0.05. Por tanto, para este caso la hipótesis nula se rechaza y se confirma que existen diferencias significativas entre los valores analizados.

Para la resistencia a la compresión (Tabla 3.14) y la sorptividad (Tabla 3.15) los resultados son diferentes, en ambos casos el valor-p es mayor de 0.05 y por tanto se acepta la hipótesis nula. Esto permite afirmar que los valores tanto de resistencia a la compresión como de sorptividad son similares para todos los concretos. Las bajas prestaciones de diseño evitaron la existencia de diferencias significativas en las propiedades mecánicas y de durabilidad, entre el concreto convencional y los concretos de agregados ligeros. Para diseños de mayores prestaciones estas diferencias deben aparecer, como se ha publicado en diferentes estudios [89], [96]. Esto se debe principalmente a que estas propiedades, para diseños de bajas prestaciones, dependen mayormente de la matriz aglomerante y en menor medida de los agregados, cuando las exigencias mecánicas son más elevadas, comienzan a influir las características de los agregados, convirtiéndose en el factor limitante.

Las propiedades físicas, por el contrario, están más influenciadas por los agregados y no tanto de la pasta aglomerante, por este motivo, sí se reportan diferencias significativas en la densidad de los concretos.

El modelo ANOVA detecta la existencia de estas diferencias, pero no especifica cuál o cuáles de los concretos analizados son los responsables de dichas diferencias. Para esto, es necesario realizar otras pruebas, como el método de Tukey. Este método permite

identificar cuáles de las diferentes medias son responsables de las diferencias significativas detectadas [97]. En el Anexo V, se detalla el procedimiento necesario para la realización de esta prueba.

En la Tabla 3.16 se muestran los parámetros utilizados para la prueba de Tukey y en la Tabla 3.17, las diferencias entre los valores medios de densidad de los concretos.

Tabla 3.16. Valores de los parámetros utilizados en la prueba de Tukey.

Parámetro	Nomenclatura	Valor numérico
Diferencia honestamente significativa	$T$	61.51
Multiplicador	$q_{\alpha}$	4.53
Cuadrado del error medio	$MSE$	553.17
Tamaño de muestra	$n$	3

Tabla 3.17. Comparación por pares de los valores medios de densidad de los concretos.

Concreto "i"	Concreto "j"	$\bar{x}_i$	$\bar{x}_j$	$ \bar{x}_i - \bar{x}_j $
CCN	CLT	2,374	1,930	<b>445</b>
CCN	CRV	2,374	1,917	<b>457</b>
CCN	CRV2	2,374	1,879	<b>495</b>
CLT	CRV	1,930	1,917	13
CLT	CRV2	1,930	1,879	51
CRV	CRV2	1,917	1,879	38

\* En negritas se destacan las diferencias entre medias que reportan diferencias significativas.

En la Tabla 3.17 se observa que la diferencia de densidad del concreto CCN con cada uno de los restantes concretos muestra valores mayores que el parámetro  $T$  (Tabla 3.16), lo que indica que los valores son significativamente diferentes. Para el resto de las comparaciones no se encontraron diferencias significativas y, por lo tanto, se considera que los valores de densidad de todos los concretos ligeros son similares.

Con este último resultado se valida la hipótesis planteada en el presente trabajo, ya que no se reportaron diferencias significativas entre las propiedades físico-mecánicas y de

### Capítulo III – Estudio experimental de la producción de concretos ligeros

durabilidad del concreto ligero de agregado natural y los concretos ligeros de agregados vitrocerámicos.

## 4. Conclusiones

1. En el proceso de producción de agregados vitrocerámicos, fabricados a partir de lodos de plantas potabilizadoras y arcilla, se identificaron tres variables con una influencia estadísticamente significativa sobre las propiedades del material. Estas variables fueron: el contenido de lodo de la mezcla, el tamaño de partículas de las materias primas y las condiciones de calcinación de la mezcla.

2. Los agregados vitrocerámicos, producidos a partir de lodos de plantas potabilizadoras y arcilla a una temperatura máxima de calcinación de 1,200 °C, cumplen los requisitos establecidos en la norma ASTM C330/C330M-14 para su empleo en concretos ligeros, siempre que la incorporación de lodos no sea mayor del 50% y se utilicen partículas menores de 0.300 mm de ambas materias primas.

3. Los concretos producidos con agregados vitrocerámicos fabricados con un 50% de incorporación de lodos, para una relación  $a/c = 0.61$  y un contenido de cemento =  $311 \text{ kg/m}^3$ , cumplen los requisitos técnicos que permiten clasificarlos como concretos ligeros estructurales. Estas condiciones límites permiten alcanzar el valor mínimo de resistencia a la compresión normado para concretos estructurales y maximizan el contenido de lodos presente en los agregados sin comprometer el desempeño del concreto.

4. Entre el concreto ligero de agregado natural y los concretos ligeros de agregados vitrocerámicos no existen diferencias estadísticamente significativas, lo que permite afirmar que los agregados naturales pueden ser sustituidos en un 100% sin comprometer las propiedades del concreto y que este material (concreto con agregados vitrocerámicos) puede ser utilizado en las mismas aplicaciones que el de agregado natural.

**Referencias**

- [1] R. Herman, S. A. Aedekani, and J. H. Ausubel, "Dematerialization," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 38, pp. 333–347, 1990.
- [2] H. G. van Oss and A. C. Padovani, "Cement Manufacture and the Environment and Opportunities," *J. Ind. Ecol.*, vol. 7, no. 1, pp. 93–126, 2003.
- [3] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, "Sustainable development and climate change initiatives," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, Feb. 2008.
- [4] J. L. Clarke, *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. 2005.
- [5] F. Espejel, "Valoración de los lodos generados en plantas potabilizadoras para elaborar productos cerámicos," UNAM, 2007.
- [6] J. Acevedo, E. Díaz, E. Martínez, and E. Amat, *Materiales de Construcción*. La Habana: Editorial Félix Varela, 1985.
- [7] P. C. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Fourth Edi., no. January. Elsevier Science & Technology Books, 2004.
- [8] ACI 213R-03, *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. 2003, pp. 1–38.
- [9] J. P. Doukakis, "Lightweight self consolidating fiber reinforced concrete," The State University of New Jersey, 2013.
- [10] D. J. M. Flower and J. G. Sanjayan, "Green house gas emissions due to concrete manufacture," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 12, no. 5, pp. 282–288, May 2007.
- [11] M. F. Ashby, "Chapter 2 – Resource consumption and its drivers," in *Materials and the Environment (Second Edition)*, 2013, pp. 15–48.
- [12] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio, "Sustainable cement production—present and future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 642–650, Jul. 2011.
- [13] C. Meyer, "The greening of the concrete industry," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 601–605, Sep. 2009.
- [14] A. Schuurmans, R. Rouwette, N. Vonk, J. W. Broers, H. A. Rijnsburger, and H. S. Pietersen, "LCA Case Studies LCA of Finer Sand in Concrete," *Int. J. Life Cycle*

- Assess., vol. 10, no. 2, pp. 131–135, 2005.
- [15] K. Humphreys and M. Mahasenan, “Toward a Sustainable Cement Industry,” 2002.
- [16] E. Gartner, “Industrially interesting approaches to ‘low-CO<sub>2</sub>’ cements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 1489–1498, Sep. 2004.
- [17] A. Josa, A. Aguado, A. Heino, E. Byars, and A. Cardim, “Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 8, pp. 1313–1320, Aug. 2004.
- [18] B. González-Corrochano, J. Alonso-Azcárate, and M. Rodas, “Production of lightweight aggregates from mining and industrial wastes,” *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 8, pp. 2801–12, Jun. 2009.
- [19] H. Yuan and L. Shen, “Trend of the research on construction and demolition waste management,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 670–679, 2011.
- [20] Ö. Özkan and İ. Yüksel, “Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 1288–1298, Jun. 2008.
- [21] J. de Brito, A. S. Pereira, and J. R. Correia, “Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 429–433, Apr. 2005.
- [22] C. S. Poon and D. Chan, “Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 8, pp. 569–577, Oct. 2006.
- [23] D. Wattanasiriwech, a. Saiton, and S. Wattanasiriwech, “Paving blocks from ceramic tile production waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 18, pp. 1663–1668, Dec. 2009.
- [24] C. Medina, M. Frías, and M. I. Sánchez de Rojas, “Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 112–118, Jun. 2012.
- [25] T.-Y. Tu, Y.-Y. Chen, and C.-L. Hwang, “Properties of HPC with recycled aggregates,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 943–950, May 2006.
- [26] A. Ajdukiewicz and A. Kliszczewicz, “Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, no. 2, pp. 269–279, Apr. 2002.
- [27] S. C. Kou and C. S. Poon, “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 9,

- pp. 622–627, Oct. 2009.
- [28] Z. J. Grdic, G. a. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1129–1133, Jul. 2010.
- [29] J. M. Khatib, “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 763–769, Apr. 2005.
- [30] L. Evangelista and J. De Brito, “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, pp. 397–401, 2007.
- [31] C. J. Zega and A. A. Di Maio, “Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements.,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 11, pp. 2336–40, Nov. 2011.
- [32] L. Evangelista and J. De Brito, “Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 1, pp. 9–14, 2010.
- [33] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, and M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 735–742, 2007.
- [34] J. a. Pérez-Benedicto, M. Del Río-Merino, J. L. Peralta-Canudo, and M. De la Rosa-La Mata, “Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricación,” *Mater. Construcción*, vol. 62, no. 305, pp. 25–37, Nov. 2011.
- [35] A. Rao, K. N. Jha, and S. Misra, “Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, pp. 71–81, 2007.
- [36] V. Corinaldesi, “Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 9, pp. 1616–1620, 2010.
- [37] S. Kou, B. Zhan, and C. Poon, “Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 549–556, Mar. 2012.
- [38] S. M. Levy and P. Helene, “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 11, pp. 1975–1980, Nov. 2004.
- [39] F. . Olorunsogo and N. Padayachee, “Performance of recycled aggregate concrete

- monitored by durability indexes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 179–185, Feb. 2002.
- [40] R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, and W. Chalee, "Effect of ground bagasse ash on mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete," *Mater. Des.*, vol. 36, pp. 597–603, Apr. 2012.
- [41] K. Y. Ann, H. Y. Moon, Y. B. Kim, and J. Ryou, "Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 6, pp. 993–9, Jan. 2008.
- [42] R. Somna, C. Jaturapitakkul, and A. M. Amde, "Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 7, pp. 848–854, Aug. 2012.
- [43] E. Anastasiou, K. Georgiadis Filikas, and M. Stefanidou, "Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 154–161, Jan. 2014.
- [44] I. Papayianni and E. Anastasiou, "Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 8, pp. 1412–1417, Aug. 2010.
- [45] S. Donatello and C. R. Cheeseman, "Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): a review.," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 11, pp. 2328–40, Nov. 2013.
- [46] R. M. Ramirez Zamora, O. Ceron Alfaro, N. Cabriol, F. Espejel Ayala, and A. Duran Moreno, "Valorization of drinking water treatment sludges as raw materials to produce concrete and mortar," *Am. J. Environ. Sci.*, vol. 4, no. 3, pp. 223–228, 2008.
- [47] T. Joo-Hwa and Y. Woon-Kwong, "Sludge Ash as Lightweight Concrete Material," *J. Environ. Eng.*, vol. 115, pp. 56–64, 1989.
- [48] K. J. Mun, "Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 7, pp. 1583–1588, Jul. 2007.
- [49] M. . Shannag, "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 6, pp. 399–406, Dec. 2000.
- [50] M. Mazloom, a. a. Ramezaniapour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on

- mechanical properties of high-strength concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 4, pp. 347–357, May 2004.
- [51] P. K. Metha, “Properties of blended cements made from rice husk ash,” *J. Am. Concr. Inst.*, vol. 74, pp. 440–442, 1977.
- [52] M. Nehdi, J. Duquette, and a. El Damatty, “Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 8, pp. 1203–1210, Aug. 2003.
- [53] V. G. Jiménez-Quero, F. M. León-Martínez, P. Montes-García, C. Gaona-Tiburcio, and J. G. Chacón-Nava, “Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 691–701, Mar. 2013.
- [54] T. Chungsangunsit, S. H. Gheewala, and S. Patumsawad, “Environmental Assessment of Electricity Production from Rice Husk: A Case Study in Thailand,” pp. 51–62, 2004.
- [55] M. Cyr, M. Coutand, and P. Clastres, “Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 8, pp. 1278–1289, Aug. 2007.
- [56] J. R. Correia, N. M. Almeida, and J. R. Figueira, “Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures,” *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 15, pp. 1745–1753, Oct. 2011.
- [57] E. Pavón, M. Etxeberria, and I. Martínez, “Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones , activa e inerte,” *Rev. la Construcción*, vol. 10, no. 3, pp. 4–15, 2011.
- [58] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, and E. M. R. Fairbairn, “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 5, pp. 410–418, May 2008.
- [59] U.S. Geological Survey, “Sand and Gravel (Construction) Statistics,” 2014.
- [60] U.S. Geological Survey, “Stone (crushed) Statistics,” 2014.
- [61] C. R. Cheeseman and G. S. Virdi, “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 45, no. 1, pp. 18–30, Sep. 2005.

- [62] E. Fakhfakh, W. Hajjaji, M. Medhioub, F. Rocha, a Lopezgalindo, M. Setti, F. Kooli, F. Zargouni, and F. Jamoussi, "Effects of sand addition on production of lightweight aggregates from Tunisian smectite-rich clayey rocks," *Appl. Clay Sci.*, vol. 35, no. 3–4, pp. 228–237, Feb. 2007.
- [63] R. M. Ramírez Zamora, R. Schouvenaars, and F. Espejel Ayala, "Producción de cerámicas celulares con elevada resistencia específica para la industria de la construcción producidas mediante la valorización de lodos generados en el proceso de coagulación-floculación de plantas potabilizadoras," México D. F.
- [64] G. Baykal and A. G. Döven, "Utilization of fly ash by pelletization process; theory, application areas and research results," vol. 30, pp. 59–77, 2000.
- [65] C. Videla and P. Martínez, "Caracterización físico-mecánica y microscópica de áridos ligeros de cenizas volantes producidos en frío Physical ^ mechanical and microscopic characterization of cold bonded fly ash lightweight aggregates," *Mater. Construcción*, vol. 52, no. 268, 2002.
- [66] R. De´Gennaro, P. Cappelletti, G. Cerri, M. Degennaro, M. Dondi, and A. Langella, "Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates," *Appl. Clay Sci.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 71–81, Apr. 2004.
- [67] ASTM C 330M-09, *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. 1999.
- [68] C. M. Riley, "Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 34, no. 4, pp. 121–128, Apr. 1951.
- [69] "Disposal and recycling routes for sewage sludge Part 2 – Regulatory report."
- [70] X. Wang, Y. Jin, Z. Wang, Y. Nie, Q. Huang, and Q. Wang, "Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 4, pp. 1330–5, Apr. 2009.
- [71] B. J.-H. Tay, W.-K. Yip, and K.-Y. Show, "Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material," *J. Environ. Eng.*, vol. 117, no. 6, pp. 834–844, 1992.
- [72] I.-J. Chiou, K.-S. Wang, C.-H. Chen, and Y.-T. Lin, "Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash.," *Waste Manag.*, vol. 26, no. 12, pp. 1453–61, Jan. 2006.
- [73] C.-C. Tsai, K.-S. Wang, and I.-J. Chiou, "Effect of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-flux ratio change on

- the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 134, no. 1–3, pp. 87–93, Jun. 2006.
- [74] C. R. Cheeseman, C. J. Sollars, and S. McEntee, “Properties, microstructure and leaching of sintered sewage sludge ash,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 40, no. 1, pp. 13–25, Dec. 2003.
- [75] K.-S. Wang, I.-J. Chiou, C.-H. Chen, and D. Wang, “Lightweight properties and pore structure of foamed material made from sewage sludge ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 8, pp. 627–633, Oct. 2005.
- [76] S. Chatterji, “The role of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the breakdown of Portland cement concrete due to alkali-silica reaction,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 185–8, 1979.
- [77] S. R. Teixeira, G. T. a. Santos, a. E. Souza, P. Alessio, S. a. Souza, and N. R. Souza, “The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 561–565, Oct. 2011.
- [78] W. E. Lee, G. P. Souza, C. J. McConville, T. Tarvornpanich, and Y. Iqbal, “Mullite formation in clays and clay-derived vitreous ceramics,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 28, no. 2, pp. 465–471, 2008.
- [79] V. M. Sánchez Orendain, “Tratamiento de  $\text{NO}_x$  mediante catalizadores soportados en vitrocerámicos celulares producidos con lodos de plantas potabilizadoras,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [80] R. D. Rawlings, J. P. Wu, and A. R. Boccaccini, “Glass-ceramics: Their production from wastes---A Review,” *J. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 733–761, 2006.
- [81] G. Box, W. Hunter, and S. Hunter, *Statistics for experiments*. Wiley Interscience, 1978.
- [82] G. Box, S. Hunter, and W. Hunter, *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery, Second Edition*. Wiley, 2009.
- [83] R. M. Ramírez Zamora, F. Espejel Ayala, M. Solís López, O. González Barceló, R. W. Gómez, J. L. Pérez Mazariego, R. Navarro-González, and R. Schouwenaars, “Optimisation and analysis of the synthesis of a cellular glass-ceramic produced from water purification sludge and clay,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 123, pp. 232–238, 2015.
- [84] A. R. Rossini, S. Cohen Arazi, and T. G. Krenkel, “MuUitización de mezclas de arcilla

- caolinítica e hidróxido de aluminio,” *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 9, no. 5, pp. 579–592, 1970.
- [85] Y. F. Chen, M. C. Wang, and M. H. Hon, “Phase transformation and growth of mullite in kaolin ceramics,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, no. 8, pp. 2389–2397, 2004.
- [86] A. M. Alper, *Phase Diagrams in Advanced Ceramics*. Academic Press, 1995.
- [87] ACI 211.1-91, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, no. Reapproved. 2002, pp. 1–38.
- [88] ACI 211.2-98, *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98)*. 1998, pp. 1–18.
- [89] B. L. A. Tuan, C.-L. Hwang, K.-L. Lin, Y.-Y. Chen, and M.-P. Young, “Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 334–339, 2013.
- [90] İ. B. Topçu and T. Uygunoğlu, “Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1286–1295, Jul. 2010.
- [91] M. E. Dilli, H. N. Atahan, and C. Şengül, “A comparison of strength and elastic properties between conventional and lightweight structural concretes designed with expanded clay aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 260–267, Dec. 2015.
- [92] A. Sales, F. R. de Souza, W. N. dos Santos, A. M. Zimer, and F. do Couto Rosa Almeida, “Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 12, pp. 2446–2453, Dec. 2010.
- [93] X. Liu, K. S. Chia, and M.-H. Zhang, “Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 335–343, Jan. 2011.
- [94] J. J. Howland Albear and A. R. Martín Acosta, “Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos,” *Rev. Cuba. Ing.*, vol. III, no. 2, pp. 17–24, 2012.
- [95] ASTM C 1585 - 04, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. 2004.
- [96] A. A. A. Hassan, M. K. Ismail, and J. Mayo, “Mechanical properties of self-

consolidating concrete containing lightweight recycled aggregate in different mixture compositions,” *J. Build. Eng.*, vol. 4, pp. 113–126, Dec. 2015.

- [97] J. L. Devore, N. R. Farnum, and J. A. Doi, *Applied Statistics for Engineers and Scientists*. Richard Stratton, 2013.
- [98] S. Rostam, R. F. M. Bakker, A. W. Beeby, G. Hartl, D. Van Nieuwenburg, P. Schiessl, L. Sentler, and A. P. van Vugt, *Durable Concrete Structures*. Thomas Telford, 1997.

## Anexos

### Anexo I. Parámetros estadísticos del diseño factorial fraccionado

#### *Relación de definición y patrones de confusión del diseño factorial*

Para crear un diseño fraccionado se necesita establecer la relación de definición. Esta relación se utiliza para conocer qué factores se encuentran confundidos en el diseño. Para el presente experimento la relación es  $I = ABD = ACE$ . Los generadores son  $D = AB$  y  $E = AC$ , debido a que la columna correspondiente a los factores D y E se obtiene a partir de la multiplicación de las columnas de los factores A, B y C.

La relación de definición permite construir la estructura alias para el diseño, esta estructura indica los factores que se encuentran confundidos con otros. Si se desea hallar este patrón de confusión, se multiplica el factor por la relación de definición, considerando las propiedades  $IX = X$  y  $XX = I$  (X es cualquier factor), a modo de ejemplo se tiene:

$$A*I = A*ABD = A*ACE = A^2BD = A^2CE = IBD = ICE$$

$$A = CD = CE$$

Esto nos informa que los efectos de las interacciones de segundo orden entre los factores CD y CE se encuentran confundidas con el efecto del factor principal A. Por tanto, se considera que es un diseño de resolución III.

#### *Resultados del ANOVA para el diseño factorial fraccionado*

En las tablas A.1 y A.2 se muestran los resultados del análisis de varianza para cada una de las propiedades analizadas en el diseño factorial fraccionado.

Tabla A.1. Análisis de varianza para la densidad

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-p
A:Hum Inicial	0.0595125	1	0.0595125	3.65	0.1963
B: Molde	0.0078125	1	0.0078125	0.48	0.5605
C:Tiempo Tmax	0.0000125	1	0.0000125	0.00	0.9804
D:Cont Iodo	0.0105125	1	0.0105125	0.64	0.5063

E:Tam partículas	0.0001125	1	0.0001125	0.01	0.9414
Error total	0.032625	2	0.0163125	-	-
Total (corr.)	0.110587	7	-	-	-

Tabla A.2. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p*
A:Hum Inicial	0.1152	1	0.1152	0.32	0.6286
B: Molde	34.1138	1	34.1138	94.75	<b>0.0104</b>
C:Tiempo Tmax	2.1632	1	2.1632	6.01	0.1338
D:Cont lodo	12.3504	1	12.3504	34.30	<b>0.0279</b>
E:Tam partículas	19.7821	1	19.7821	54.95	<b>0.0177</b>
Error total	0.72005	2	0.360025	-	-
Total (corr.)	69.2448	7	-	-	-

\* En negritas se destacan los valores del valor-p menores de 0.05, que indican la existencia de diferencias significativas.

En las tablas con los resultados del ANOVA, se particiona la variabilidad en piezas separadas para cada uno de los efectos, probando la significancia estadística de cada efecto a través de la comparación de su cuadrado medio con un estimado del error experimental.

Para el caso de la densidad, ningún efecto tiene una valor-P menor que 0.05, indicando que ninguna de las variables presenta significancia estadística, para un nivel de confianza de 95 %. Para la resistencia a la compresión, por el contrario, tres de las variables arrojaron un valor-P menor de 0.05, indicando la influencia estadísticamente significativa de estas variables sobre la propiedad analizada.

#### *Distribución de los residuos generados*

En las figuras A.1 y A.2 se muestran los residuos generados para la densidad y resistencia a la compresión respectivamente. Según se puede observar, en ninguno de los casos se

muestra una tendencia definida, lo que permite afirmar que el modelo seleccionado es válido para el análisis.

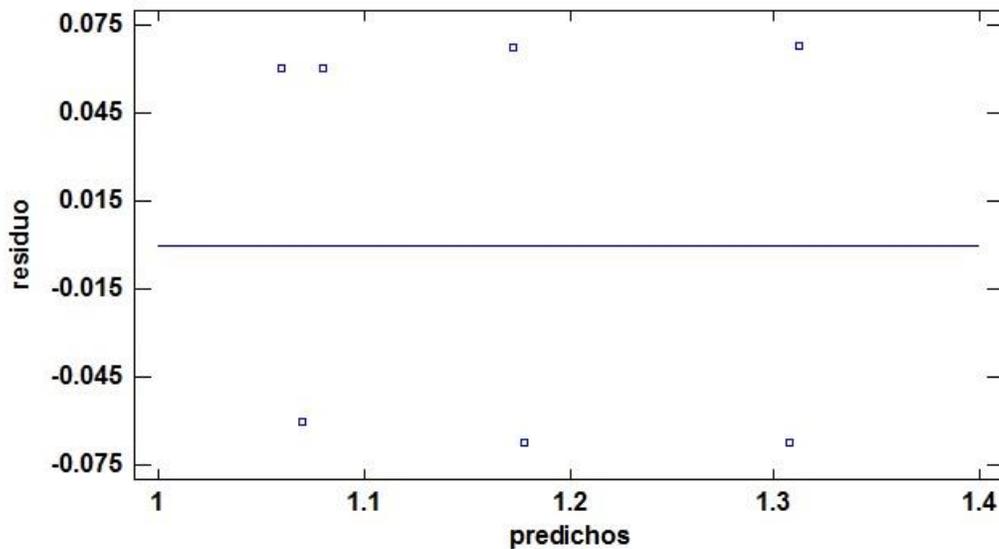


Figura A.1. Distribución de los residuos obtenidos en el diseño factorial fraccionado para el análisis de la densidad.

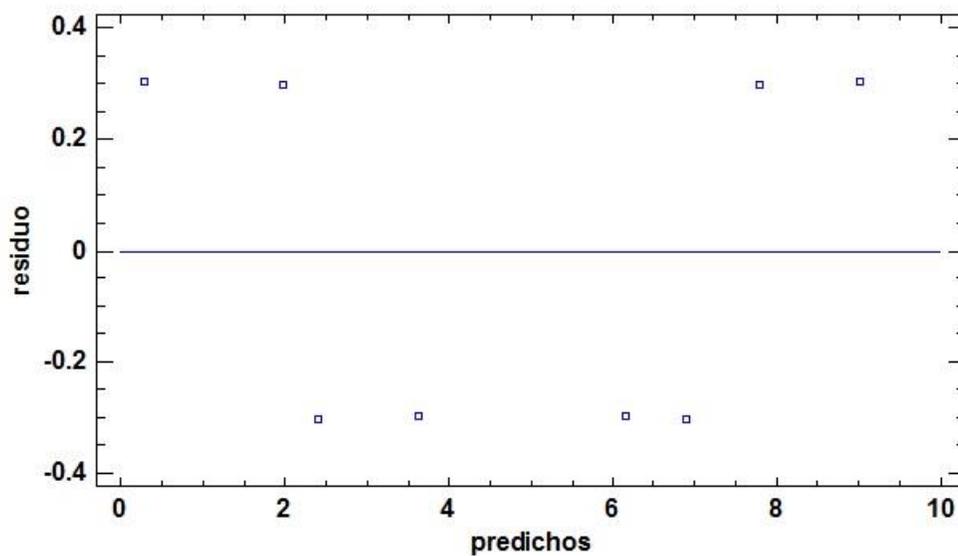


Figura A.2. Distribución de los residuos obtenidos en el diseño factorial fraccionado para el análisis de la resistencia a la compresión.

## Anexo II. Parámetros estadísticos del diseño de superficie de respuesta

### Resultados del ANOVA para el diseño de superficie de respuesta

En las tablas A.3, A.4 y A.5 se muestran los resultados del análisis de varianza para cada una de las propiedades analizadas en el diseño de superficie de respuesta.

Tabla A.3. Análisis de varianza para la densidad. Diseño superficie de respuesta.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-p
A:Cont lodo	0.269223	1	0.269223	13.71	<b>0.0014</b>
B:Tam partículas	0.00472597	1	0.00472597	0.24	0.6291
AA	0.000139329	1	0.000139329	0.01	0.9337
AB	0.033885	1	0.033885	1.73	0.2038
BB	0.0267646	1	0.0267646	1.36	0.2568
Error total	0.392737	20	0.0196369	-	-
Total (corr.)	0.755846	25	-	-	-

Tabla A.4. Análisis de varianza para la resistencia a la compresión. Diseño superficie de respuesta.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-p
A:Cont lodo	588.358	1	588.358	30.54	<b>0.0000</b>
B:Tam partículas	124.056	1	124.056	6.44	<b>0.0196</b>
AA	98.6815	1	98.6815	5.12	<b>0.0349</b>
AB	23.6956	1	23.6956	1.23	0.2805
BB	61.59	1	61.59	3.20	0.0889
Error total	385.258	20	19.2629	-	-
Total (corr.)	1399.29	25	-	-	-

Tabla A.5. Análisis de varianza para la resistencia relativa. Diseño superficie de respuesta.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-p
A:Cont lodo	291.469	1	291.469	35.26	<b>0.0000</b>
B:Tam partículas	79.935	1	79.935	9.67	<b>0.0055</b>

AA	75.7607	1	75.7607	9.17	<b>0.0066</b>
AB	21.2014	1	21.2014	2.57	0.1249
BB	19.2714	1	19.2714	2.33	0.1424
Error total	165.303	20	8.26515	-	-
Total (corr.)	727.17	25	-	-	-

Como se muestra en las tablas con los resultados del ANOVA y se señaló en el Capítulo II del presente trabajo, las variables significativas en la resistencia a la compresión y la resistencia relativa son similares. Para ambos casos, el contenido de lodo, el tamaño de partícula y el efecto doble de la primera variable, mostraron tener significancia estadística (valor-P menor de 0.05) sobre el resultado. Para el caso de la densidad, solamente el contenido de lodo resultó tener una influencia considerable sobre el resultado.

#### *Distribución de los residuos generados*

En las figuras A.3, A.4 y A.5 se muestra la distribución de los residuos generados en el análisis del modelo. Cualquier patrón no aleatorio podría indicar que el modelo seleccionado no describe adecuadamente los datos observados.

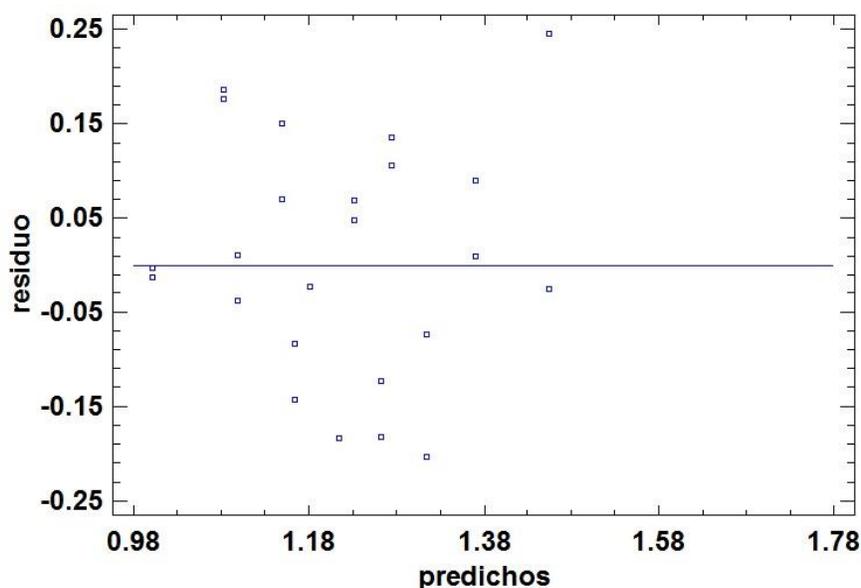


Figura A.3. Distribución de los residuos obtenidos para la densidad.

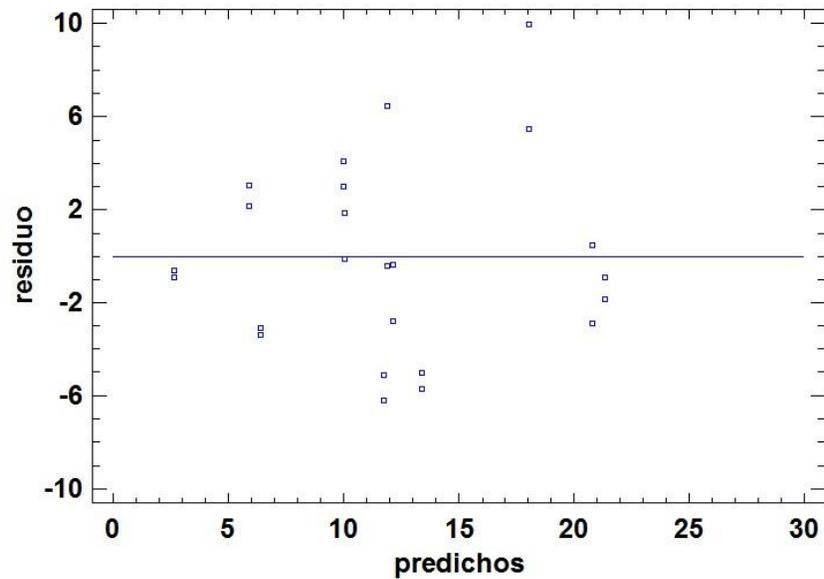


Figura A.4. Distribución de los residuos obtenidos para la resistencia a la compresión.

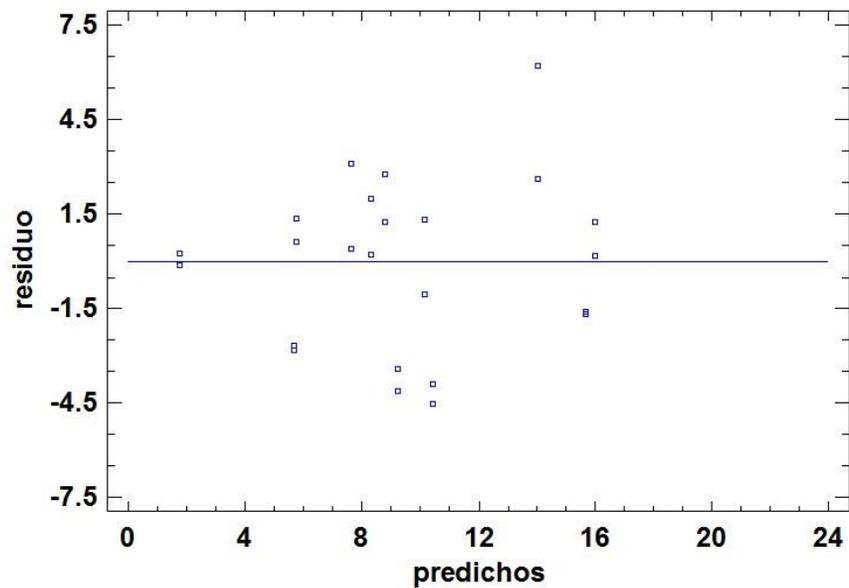


Figura A.5. Distribución de los residuos obtenidos para la resistencia relativa.

Como puede observarse, para cada una de las propiedades, la distribución de los residuos generados no presenta ninguna tendencia apreciable, por tanto, se puede afirmar que el modelo es válido para la interpretación de los datos analizados.

### Anexo III. Eflorescencia de rayos X

En la Tabla A.6 se muestran los resultados de la eflorescencia de rayos X reportados en Espejel et. al. [5]. El lodo y la arcilla utilizados en el presente trabajo, provienen de la misma muestra empleada en el trabajo referenciado.

Tabla A.6. Resultados de la eflorescencia de rayos X del lodo y la arcilla [5].

% w/w	Lodo	Arcilla
SiO <sub>2</sub>	34.94	58.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.24	19.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.75	5.77
TiO	0.42	0.88
Mn	0.05	0.10
Mg	0.56	1.24
Ca	1.26	2.47
Na <sub>2</sub>	0.13	1.75
K <sub>2</sub>	0.49	0.95
P <sub>2</sub> O	0.46	0.09
LOI	24.0	9.28

## Anexo IV. Determinación de las propiedades del concreto

### *Densidad*

La densidad en el concreto puede determinarse para tres estados o condiciones: saturado, seco en estufa o en equilibrio.

Para el estado saturado, la muestra se sumerge en agua hasta que no se observe un incremento de la masa. La masa de la muestra en esta condición se denomina  $m_1$ .

Para el estado seco, la muestra se introduce en una estufa a una temperatura de  $105 \pm 5$  °C hasta alcanzar un peso constante. Esta masa se denomina  $m_2$ .

El volumen de la muestra se determina a través del peso sumergido, para determinar este peso la muestra debe estar en estado saturado. Este peso se denomina  $m_3$ .

El volumen de la muestra se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{m_1 - m_3}{\rho_w}$$

$m_1$ : Peso saturado de la muestra

$m_3$ : Peso desplazado de agua por la muestra

$\rho_w$ : densidad del agua

La densidad de la muestra de concreto se determina como:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$m$ : puede ser tanto  $m_1$  como  $m_2$  en función de cómo se desee determinar la densidad

$V$ : volumen de la muestra

### *Absorción de agua*

La absorción de agua a presión normal del concreto difiere de la permeabilidad del mismo, pues este último ensayo se realiza a una presión tal que el aire alojado en todos los poros permeables del concreto es desalojado. Para determinar la absorción de agua, se utilizan los mismos datos obtenidos para la determinación de la densidad, calculándose la absorción por la siguiente expresión:

$$Ab = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 \quad (\%)$$

$m_1$ : Peso saturado de la muestra

$m_2$ : Peso seco de la muestra

### *Resistencia a la compresión*

La resistencia a la compresión se mide sobre las probetas cilíndricas con una relación altura/diámetro igual a dos. Se debe verificar que la carga a aplicar sobre la probeta esté uniformemente distribuida en toda el área de contacto, para favorecer este hecho, se deben emplear diferentes tipos de refrentados.

La carga se aplica de forma continua y sin choques bruscos, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta sea de  $5 \pm 2 \text{ Kgf/cm}^2/\text{s}$  ( $0.5 \pm 0.2 \text{ MPa/s}$ ). La carga se aplicará sin variación bajo estas condiciones hasta la rotura de la probeta, tomándose como carga de rotura la máxima alcanzada.

La resistencia a la compresión (en MPa) de la probeta ensayada se calcula por la fórmula:

$$R_c = \frac{10F}{A} \quad (MPa)$$

F: Carga de rotura en, (N)

A: Área de la sección transversal de la probeta, ( $\text{mm}^2$ )

### *Absorción de agua por capilaridad*

Para la realización del ensayo se corta una lámina delgada de concreto de  $50\text{mm} \pm 3\text{mm}$  de espesor de una probeta cilíndrica. Esta muestra es pre-acondicionada hasta alcanzar un equilibrio de humedad. Este equilibrio se logra con un secado a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  por 48 horas (hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador. La superficie de succión será la parte del corte de la muestra pues con esto se asegura que esté libre de carbonatación y otras impurezas. El área lateral curva del espécimen se cubren con algún material impermeable (parafina, resina epoxi, etc.) para evitar la evaporación de agua y asegurar el transporte axial del agua durante el ensayo. Las probetas pre-acondicionadas se colocan sobre un lecho de arena fina de no más de 10 mm de espesor, en un recipiente estanco

que contenga una altura de agua por encima del lecho de arena de aproximadamente 5mm. Para la realización de este ensayo se emplea agua potable.

Las probetas son pesadas antes de ser colocadas en el agua y se volverán a pesar a las edades de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4; 6; 26; 54, 75, 120, 147, 173 y 192 horas, contadas desde el inicio del ensayo. Con los pesos obtenidos a las diferentes edades indicadas se obtiene una curva similar a la mostrada en la Figura A.6. El estado 1 corresponde al llenado de agua de los poros capilares, mientras que el estado 2 corresponde al llenado gradual de los poros inertes o vacíos de aire, por un proceso de disolución-difusión de aire.

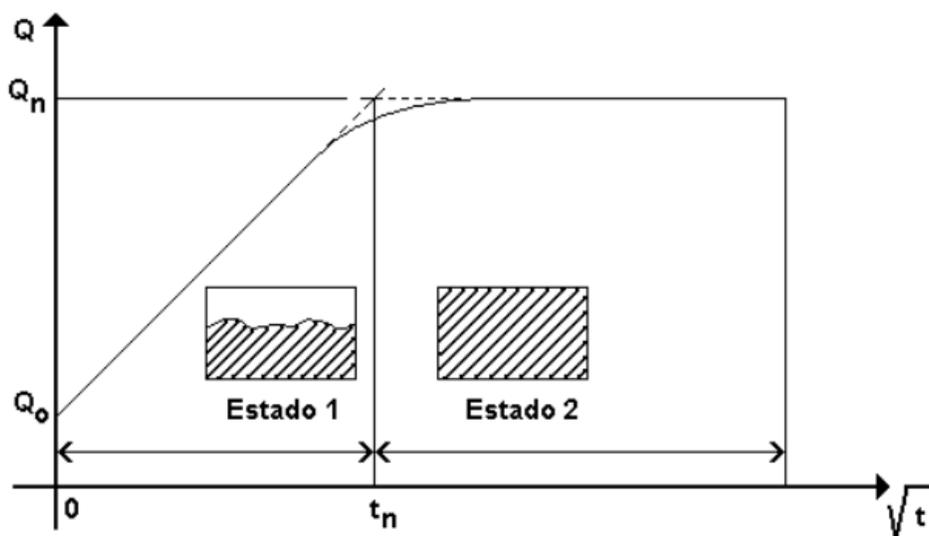


Figura A.6. Curva típica de absorción de agua por el ensayo de capilaridad.

A partir de estas mediciones se obtienen los siguientes parámetros:

#### Absorción capilar

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d} \quad (mm)$$

$m_t$ : cambio de masa del espécimen, para un tiempo t, (g)

$a$ : el área expuesta al espécimen, (mm<sup>2</sup>)

$d$ : densidad del agua, (g/mm<sup>3</sup>)

#### Ritmo inicial de absorción

El ritmo inicial de absorción de agua ( $\text{mm/s}^{1/2}$ ) se define como la pendiente de la línea de mejor ajuste de la gráfica de  $I$  contra la raíz del tiempo ( $\text{s}^{1/2}$ ). La línea se debe obtener de un análisis de regresión utilizando todos los puntos desde 1 min hasta 6 h, excluyendo los puntos a partir de los cuales se observe un claro cambio de pendiente. Si los datos entre 1 min y 6 h no tienen una relación linear (coeficiente de correlación menor de 0.98) y muestran una curvatura marcada, el ritmo inicial de absorción de agua no puede ser determinado.

$$I = S_i\sqrt{t} + b \quad (\text{se utilizan los puntos medidos hasta 6 h})$$

$S_i$ : ritmo inicial de absorción

#### Resistencia a la penetración del agua

$$m = \frac{t_n}{h^2} \left( \frac{s}{m^2} \right)$$

$t_n$ : tiempo en el punto crítico (obtenido del gráfico), (s)

$h$ : altura del espécimen, (m)

#### Porosidad efectiva

$$\varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_0}{a \cdot h \cdot 1000} \quad (\%)$$

$h$ : altura del espécimen, (m)

$Q_0$ : peso inicial del espécimen, (kg)

$Q_n$ : peso del espécimen en el punto crítico, (kg)

$a$ : área de la sección transversal, ( $\text{m}^2$ )

### Anexo V. Método de Turkey

El método de Tukey permite realizar análisis separados para decidir cuándo  $\mu_i = \mu_j$  para cada pareja de medias de un ANOVA. Este método se basa en la selección de un nivel de significancia,  $\alpha$ , que se aplica para todas las comparaciones a realizar. A modo de ejemplo, cuando se utiliza un nivel de significancia del 5%, se está asegurando que existe como máximo un 5% de posibilidad de obtener un falso positivo entre toda la serie de comparaciones de parejas. O sea, que existe una posibilidad de un máximo de 5% de concluir que dos medias de poblaciones son diferentes cuando, en realidad, son iguales. Esto es diferente a realizar todas las comparaciones entre dos medias de forma individual, cada una a un nivel  $\alpha = 0.05$ , que puede resultar en un alta probabilidad de reportar falsos positivos [97].

El método de Tukey se basa en comparar la distancia entre dos medias de las muestras,  $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ , con una diferencia honestamente significativa (threshold value) ( $T$ ), que depende de  $\alpha$  y del cuadrado del error medio ( $MSE$ ) intra-grupos del ANOVA. La fórmula para el cálculo de  $T$  es la siguiente [97]:

$$T = q_\alpha \sqrt{\frac{MSE}{n}}$$

$q_\alpha$ : Estadístico  $q$ , que sigue una distribución de rango estudentizado, y depende de dos grados de libertad ( $k, m$ ); siendo  $k$  el número de medias poblacionales a comparar y  $m$  los grados de libertad del error.

$MSE$ : Cuadrado del error medio de la prueba de ANOVA.

$n$ : Número de muestras del grupo.

Para determinar cuándo dos medias  $\mu_i$  y  $\mu_j$  son diferentes, se compara  $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$  con  $T$ . Si  $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$  excede el valor de  $T$ , se concluye que  $\mu_i \neq \mu_j$ . De lo contrario, no se puede asegurar que existen diferencias entre las dos medias [97].

**Anexo VI. Imágenes de diferentes materiales empleados en el estudio**

A continuación se muestran imágenes de las diferentes etapas de la investigación, con el objetivo de ilustrar el proceso realizado. Al pie de cada figura se realiza una breve descripción del contenido.



Figura A.7. Monolitos vitrocerámicos empleados en el diseño de superficie de respuesta. De izquierda a derecha, comenzando por la fila superior: A4, A1, B3, B2, B1, C3, C2, C1, D3, D2, D1, E4 y E1.



Figura A.8. Monitos fabricados con la fracción fina de las materias primas. De izquierda a derecha: A1 (0% lodos), B1 (30% de lodos), C1 (50% de lodos), D1 (70% de lodos) y E1 (100% de lodos).



Figura A.9. Cuatro piezas de material vitrocerámico antes de la trituración. Esta es la forma que tenían las piezas luego de la calcinación.



Figura A.10. Agregado vitrocerámico utilizado para la fabricación de los concretos ligeros estructurales. El tamaño máximo de partícula seleccionado fue de 19.1mm, como se expone en el texto. La trituración se realizó en una máquina trituradora de mandíbulas.



Figura A.11. Muestras de los concretos de agregados ligeros, se puede observar la distribución de las partículas de agregados dentro de la matriz del concreto. De izquierda a derecha: CLT, CRV y CRV2.

## Anexo VII. Actividades complementarias

### Congreso AIDIS

Una parte de los resultados de este trabajo se presentaron en el XXXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de AIDIS, celebrado en Cartagena, Colombia, del 21 al 24 de agosto de 2016. El trabajo presentado tuvo como título: “EMPLEO DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS EN LA PRODUCCIÓN DE VITROCERÁMICOS FACTIBLES PARA SU EMPLEO COMO AGREGADOS LIGEROS PARA CONCRETOS”. A continuación se muestra el certificado de participación:



### Estancia de investigación

Como parte de la investigación se realizó una estancia en la Universidad Federal del Oeste de Bahía. Se realizaron tres ensayos (absorción capilar, porosidad por adsorción/desorción de nitrógeno y velocidad de ultrasonido) a los diferentes tipos de concretos utilizados y se determinó la densidad específica de las materias primas empleadas para la fabricación de los vitrocerámicos.

Universidad Nacional Autónoma de México  
“Por mi raza hablará el espíritu”