



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

TESIS DOCTORAL

OBTENCIÓN DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVEADO CON LA INCORPORACIÓN DE
ADITIVOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE SUS
PROPIEDADES

Para obtener el grado de Doctora en Ciencias de los Materiales

Presenta

M.I.Q. Irma Alejandra Corro Escorcía

Director

Dr. Juan Hernández Ávila

Co Director

Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

Comité

Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

Dr. Felipe Legorreta García

Mineral de la Reforma, Hgo. 26 de mayo de 2025.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de mayo de 2025

Número de control: ICBI-D/810/2025

Asunto: Autorización de impresión

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial de la tesis titulada "Obtención de concreto celular autoclaveado con la incorporación de aditivos orgánicos e inorgánicos, caracterización y evaluación de sus propiedades", realizado por la sustentante Irma Alejandra Corro Escorcia con número de cuenta q03093 perteneciente al programa de Doctorado en Ciencias de los Materiales (tradicional), una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que la sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial


Dr. Juan Hernández Ávila
Director de tesis


Dr. Eleazar Salinas Rodríguez
Codirector


Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz
Titular

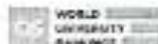

Dr. Felipe Legorreta García
Suplente


Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



Ciudad de Mineral de la Reforma, Carretera Puebla-
Tlaxcala, km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la
Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uah.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

RESUMEN

El concreto celular autoclaveado (AAC, por sus siglas en inglés) es un material de construcción ligero, poroso, térmico, acústico, ignífugo y con buenas propiedades mecánicas, ampliamente utilizado por su eficiencia energética y facilidad de manejo. En esta investigación se aborda la obtención de AAC mediante la incorporación de aditivos orgánicos e inorgánicos con el objetivo de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad. La metodología consistió en sustituciones parciales de materias primas por aditivos como lignosulfonato de sodio, diatomita y perlita. Las mezclas fueron sometidas a curado en autoclave, y posteriormente caracterizadas mediante técnicas como difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y ensayo de resistencia a la compresión.

Los resultados demostraron que la incorporación de ciertos aditivos permitió la formación de fases cristalinas como tobermorita, las cuales favorecieron el desarrollo de la resistencia mecánica. Asimismo, se observó una mejora en la microestructura del material, con una distribución más homogénea de poros y una disminución en el consumo de agua durante el proceso de fabricación. La evaluación comparativa de las diferentes formulaciones permitió identificar combinaciones óptimas de aditivos que maximizan el rendimiento del AAC sin comprometer su desempeño térmico.

Esta investigación contribuye al desarrollo de materiales de construcción más sustentables y con propiedades mejoradas, promoviendo el uso eficiente de recursos y el aprovechamiento de subproductos industriales y naturales.

INDICE GENERAL

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INDICE GENERAL..... | 4 |
| Glosario de términos..... | 8 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 10 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 14 |
| Introducción..... | 15 |
| 1. Antecedentes..... | 18 |
| 1.1 El Concreto..... | 19 |
| 1.1.1 La química del concreto..... | 19 |
| 1.1.2 Factores que afectan la resistencia a la compresión en el concreto celular autoclaveado | 22 |
| 1.1.3 Tipos de concreto..... | 23 |
| 1.1.4 Los concretos aligerados | 27 |
| 1.1.5 El concreto celular autoclaveado..... | 29 |
| 1.1.5.1 La química del concreto celular | 30 |
| 1.1.5.2 El impacto científico del concreto celular autoclaveado en la construcción. .. | 31 |
| 1.1.5.3 Aportaciones científicas enfocadas a la mejora de las propiedades del AAC | 32 |
| 2.Marco Teórico..... | 37 |
| 2.1 Historia del concreto | 37 |
| 2.2 El concreto celular autoclaveado y su química | 38 |
| 2.2.1 El AAC como el resultado de un proceso de síntesis | 39 |
| 2.3 Los aditivos, alternativa para la mejora del concreto | 42 |

| | |
|--|----|
| 2.3.1 Aditivos | 42 |
| 2.4 Aditivos para el concreto celular autoclaveado | 43 |
| Justificación..... | 47 |
| Objetivo GENERAL..... | 47 |
| Objetivos Específicos | 48 |
| Planteamiento del problema..... | 49 |
| Hipótesis..... | 51 |
| 3. Metodología | 52 |
| 3.1 Estrategia Experimental | 52 |
| 3.2 Síntesis del concreto celular autoclaveado | 71 |
| 3.3 Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del AAC | 72 |
| 4 RESULTADOS | 73 |
| 4.1 Caracterización de Materias primas | 73 |
| 4.1.1 Análisis granulométrico | 73 |
| 4.1.2 Composición mineralógica de materias primas por DRX..... | 76 |
| 4.1.3 Caracterización por MEB-EDS materias primas..... | 78 |
| 4.2 AAC ADITIVADO CON DIATOMITA | 83 |
| 4.2.1 Composición mineralógica de diatomita por DRX..... | 84 |
| 4.2.1.1 Composición mineralógica de AAC con diatomita por DRX, fase 1 | 85 |
| 4.2.1.2 Composición mineralógica de AAC con diatomita por DRX, fase 2 | 88 |
| 4.2.1.3 Composición mineralógica de AAC con diatomita por DRX, fase 3 | 91 |
| 4.2.2 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 198 | |
| 4.2.3 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 2100 | |

| | |
|---|-----|
| 4.2.4 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 3103 | |
| 4.3 Resistencia a la compresión de AAC con diatomita | 106 |
| 4.3 AAC ADITIVADO CON LIGNOSULFONATO | 108 |
| 4.3.1 Composición mineralógica de AAC con lignosulfonato de sodio por DRX. | 109 |
| 4.3.1.1. Composición mineralógica de AAC con lignosulfonato de sodio por DRX, fase 1 | 110 |
| 4.3.1.2. Composición mineralógica de AAC con lignosulfonato por DRX, fase 2..... | 112 |
| 4.3.2 Caracterización de AAC con lignosulfonato de sodio por MEB-EDS. | 116 |
| 4.3.2.1 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 1 | 116 |
| 4.3.2.2 Composición química y morfología de AAC con lignosulfonato de sodio por MEB-EDS, Fase 2 | 119 |
| 4.3.3 Resistencia a la compresión comparativa de AAC con lignosulfonato de sodio. | 120 |
| 4.4 AAC ADITIVADO CON PERLITA | 122 |
| 4.3.1 Composición mineralógica de AAC con perlita por DRX. | 122 |
| 4.3.1.1. Composición mineralógica de AAC con perlita por DRX, fase 1 | 123 |
| 4.3.1.2. Composición mineralógica de AAC con perlita por DRX, fase 2..... | 125 |
| 4.3.2 Composición mineralógica de AAC con perlita por MEB-EDS..... | 130 |
| 4.3.2.1 Composición química y morfología de AAC con perlita por MEB-EDS, Fase 1130 | |
| 4.3.2.1 Composición química y morfología de AAC con perlita por MEB-EDS, Fase 2133 | |
| 4.3.3 Resistencia a la compresión de AAC con perlita por MEB-EDS. | 135 |
| 4.5 REDUCCIÓN DE AGUA EN LA PRODUCCION DE AAC ADITIVADO CON LIGNOSULFONATO DE SODIO | 137 |
| 4.6 ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO DEL AAC | 140 |
| 5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 142 |
| 6 CONCLUSIONES..... | 144 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.1 | Impacto en la Resistencia a la Compresión..... | 145 |
|-----|--|-----|

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACRÓNIMOS

| | |
|--------|---|
| AAC | Autoclaved aerated concrete (Concreto celular autoclaveado) |
| a.C. | Antes de Cristo |
| Amp | Corriente eléctrica (Amperes) |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| d.C. | Después de Cristo |
| DL | Diatomita |
| DRX | Difracción de Rayos-X |
| DSC | Calorimetría de barrido diferencial |
| EDS | Espectroscopia de Rayos-X de energía dispersiva |
| FRX | Fluorescencia de Rayos X |
| IMCYC | Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto |
| LS | Lignosulfonato de sodio |
| MEB | Microscopía Electrónica de Barrido |
| NMX | Normas Mexicanas |
| ONNCCE | Organismo Nacional de normalización y certificación de la construcción y la edificación |
| P | Perlita |
| SP | Super plastificante |

NOTACIÓN Y TERMINOLOGÍA

| | |
|--|---|
| CO_2 | Dióxido de carbono |
| SiO_2 | Dióxido de silicio (arena sílica) |
| CaO | Óxido de calcio (cal viva) |
| Ca(OH)_2 | Hidróxido de calcio (cal hidratada) |
| $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | Sulfato de calcio di hidratado (yeso) |
| CH_4 | Metano |
| Al | Aluminio en polvo |
| H_2O | Agua |
| $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ | Tobermorita |
| CaO/SiO_2 | Relación de óxido de calcio/óxido de silicio |
| C-S-H | Hidrato de silicato de calcio |
| δ | Densidad (kg/m^3) |
| N/mm^2 o Kg/cm^2) | Fuerza por unidad de área (Megapascal) |
| κ | Conductividad térmica ($\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) |
| V ó kV | Voltaje (voltios o kilovoltios) |
| μm | Micrómetro (micras) |
| Å | Angstrom |
| θ | Ángulo de difracción (nanómetros) |
| d | Distancia entre los planos de la red cristalina |
| λ | Longitud de onda (angstroms) |
| mg | Masa (miligramos) |
| g | Masa (gramos) |
| $^\circ\text{C}$ | Temperatura (grados Celsius) |
| $^\circ\text{K}$ | Temperatura (grados Kelvin) |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| Figura 1 Estructura porosa de AAC, basada en inspección visual y a partir de resultados de un microscopio electrónico de barrido (MEB) (Michelini, Ferretti, & Miccoli, Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments, 2023). | 30 |
| Figura 2 (a) Representación esquemática de las fases estables con espaciamiento basal y contenido de H ₂ O decrecientes , correspondientes a tobermorita de 14 Å (con cadenas simples de silicato), tobermorita de 11 Å (cadenas dobles) y tobermorita de 9 Å. (Bonaccorsi & Merlino S. & Kampf, 2005)..... | 41 |
| Figura 3. Diagrama de Flujo de Desarrollo Experimental | 53 |
| Figura 4. Materias primas utilizadas para la síntesis del AAC. | 54 |
| Figura 5 Equipo de tamizado por chorro de aire Hosokawa Micron Alpine 200SL..... | 56 |
| Figura 6 Difractómetro INEL Equinox 2000 propiedad de la UAEH..... | 61 |
| <i>Figura 7 Difractómetro BRUKER D2 PHASER propiedad de la UAEH, ICAP.</i> | <i>61</i> |
| Figura 8 Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH. | 63 |
| Figura 9. Lodos de arena sílica durante el proceso de calentamiento. | 65 |
| Figura 10. Cemento portland y yeso antes de ser adicionados. | 66 |
| Figura 11. Recipientes engrasados con aceite desmoldante..... | 66 |
| Figura 12. Reposo de 4 horas posteriores a la elaboración de la mezcla..... | 67 |
| Figura 13. Muestras de concreto celular autoclaveado previo al proceso de curado. | 68 |
| Figura 14. Diagrama de bloques que representa las etapas de fabricación del bloque de AAC. | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 15. Equipo para la determinación de fuerza de compresión marca TEST-FORM, propiedad de la empresa Aircrete México. | 72 |
| Figura 16. Difractograma de Rayos X de a) arena sílica, b) aluminio, c) cal, d) yeso y e) cemento. | 76 |
| Figura 17. Imagen de arena sílica. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS. | 78 |
| Figura 18. Imagen de cemento portland. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS. | 79 |
| Figura 19. Imagen de yeso. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS. | 80 |
| Figura 20. Imagen de cal. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS. | 81 |
| Figura 21. Imagen de polvo de aluminio. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS. | 82 |
| Figura 22 Imagen de diatomita natural a) Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 9000, b) espectro del análisis EDS. | 82 |
| Figura 23. Diagrama de fases de la formación de tobermorita (Atkinson & Harris, 1995)..... | 84 |
| Figura 24. Difractograma de Rayos X de diatomita. | 85 |
| Figura 25. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ a diferentes concentraciones de diatomita, muestra 1 con 0%, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25. | 86 |
| Figura 26. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ a diferentes concentraciones de diatomita, numero 1 sin diatomita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25. | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ a diferentes concentraciones de diatomita, numero 1 sin diatomita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%. | 92 |
| Figura 28. Fotomicrografías de tobermorita obtenida por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ en todos los casos y a) y 0% de diatomita, b) 0.10% de diatomita, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20%, y e) 0.25% de diatomita. | 98 |
| Figura 29. Fotomicrografías de tobermorita obtenida por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.8$ en todos los casos y a) y 0% de diatomita, b) 0.10% de diatomita, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20%, y e) 0.25% de diatomita. | 101 |
| Figura 30. Fotomicrografías de tobermorita obtenida por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=1.0$ en todos los casos y a) y 0% de diatomita, b) 0.10% de diatomita, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20%, y e) 0.25% de diatomita. | 104 |
| Figura 31. Resultados de resistencia a la compresión en muestras de AAC relacionada con el % de diatomita añadida..... | 106 |
| Figura 32 Difractograma de Rayos X de lignosulfonato..... | 110 |
| Figura 33. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ a diferentes concentraciones de lignosulfonato de sodio, numero 1 con 0%, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25. | 111 |
| Figura 34 Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ a diferentes concentraciones de lignosulfonato de sodio, numero 1 con 0% muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%. | 113 |
| Figura 35. Fotomicrografía obtenida en un microscopio electrónico de barrido marca Jeol con detector EDS para la muestra de lignosulfonato de sodio a 500 aumentos y 20.0kV. | 116 |
| Figura 36 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ en todos los casos y a) y 0% de ls, b) 0.10% de ls, c) 0.15% de ls, d) 0.20% de ls, y e) 0.25% de ls..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figura 37 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.8$ en todos los casos y a) y 0% de ls, b) 0.10% de ls, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20% de ls, y e) 0.25% de ls..... | 119 |
| Figura 38 Resultados de resistencia a la compresión para AAC aditivado con lignosulfonato de sodio, con relación de CaO/SiO_2 de 0.5 y 0.8..... | 121 |
| Figura 39 Difractograma de Rayos X de perlita..... | 123 |
| Figura 40 Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ a diferentes concentraciones de perlita, numero 1 sin perlita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%. | 124 |
| Figura 41 Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ a diferentes concentraciones de perlita, numero 1 sin perlita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%. | 126 |
| Figura 42 Fotomicrografía obtenida en un microscopio electrónico de barrido marca Jeol con detector EDS para la muestra de perlita a 500 aumentos y 20.0kV..... | 130 |
| Figura 43 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ en todos los casos y a) y 0%, b) 0.10%, c) 0.15%, d) 0.20% y e) 0.25% de perlita..... | 131 |
| Figura 44 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.8$ en todos los casos y a) y 0%, b) 0.10%, c) 0.15%, d) 0.20% y e) 0.25% de perlita..... | 133 |
| Figura 45 Resultados de resistencia a la compresión en muestras de AAC relacionada con el % de perlita añadido. | 136 |
| Figura 46 Gráfico comparativo de reducción de agua en el AAC con lignosulfonato de sodio. | 139 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Clasificación de los concretos de acuerdo con su resistencia. | 24 |
| Tabla 2. Clasificación de los concretos de acuerdo con su consistencia. | 25 |
| Tabla 3. Clasificación de los concretos de acuerdo con su peso volumétrico..... | 26 |
| Tabla 4. Normas utilizadas para análisis de granulometría de las materias primas. | 57 |
| Tabla 5. Formulación base y variación de aditivos para la producción del AAC experimental. .. | 65 |
| Tabla 6. Mallas y Normas utilizadas para el análisis de tamaño de partícula de las materias primas y aditivos. | 73 |
| Tabla 7. Tabla de composición química de las materias primas y aditivos. | 74 |
| Tabla 8. Especies mineralógicas identificadas en los minerales estudiados. | 75 |
| Tabla 9. Resultados de la tobermorita sintetizada durante la síntesis de AAC, utilizando diferentes proporciones de óxido (0,5 y 0,8) y añadiendo diferentes contenidos de diatomita (0, 0.10%, 0.15%, 0.20% y 0,25 %)..... | 94 |
| Tabla 10. Resultados comparativos de porcentaje de formación de tobermorita, valores de resistencia a la compresión y parámetros de cristalinidad..... | 96 |
| Tabla 11. Resultados comparativos de porcentaje de formación de tobermorita, valores de resistencia a la compresión y parámetros de cristalinidad con adición de lignosulfonato de sodio. | 115 |
| Tabla 12 Resultados comparativos de porcentaje de formación de tobermorita, valores de resistencia a la compresión y parámetros de cristalinidad con adición de perlita. | 129 |
| Tabla 13 Comparativo económico de resultados de AAC y AAC aditivado | 140 |

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, México ocupa la posición 64 en materia de calidad en infraestructura a nivel mundial, lo que refleja un fuerte rezago tecnológico y la necesidad de la industria de la construcción de ser más competitiva con nuevas tecnologías que permitan optimizar los procesos constructivos sin demérito de la calidad para actualizar y cubrir las necesidades de crecimiento demográfico con la construcción de grandes proyectos de vivienda, transporte, energía y comunicación.

Las estrategias para afrontar los retos son el desarrollo de materiales de alto desempeño con tecnologías innovadoras para optimizar los procesos constructivos y prolongar la vida útil de las estructuras, con costos bajos y de menor impacto ambiental, por ello el concreto es la mejor alternativa al respecto (Infraestructura N. C., 2004) (Construcción, 2019) (Deloya Cobián, 2021).

Y en efecto, la importancia del concreto en los proyectos, radica en que además de ser el material de construcción más ampliamente utilizado en México (En Hidalgo con una producción de 6 millones, 800 mil toneladas anuales) posee ventajas como (México G. d., 2022).

1. Capacidad de resistir una gran variedad de condiciones de exposición extremas durante su vida útil, gracias a su alta durabilidad y resiliencia.
2. Es un material de elaboración local y de alta disponibilidad que puede ser fabricado en cualquier parte del mundo, lo que ayuda a optimizar los costos y generar relativamente bajas emisiones de CO₂.
3. Sus propiedades estéticas, que permiten innovaciones arquitectónicas y flexibilidad en su diseño.

Cabe resaltar, que en nuestro país se presenta un panorama interesante para impulsar la innovación en el concreto, promoviendo una adecuada transmisión del conocimiento,

impulsando el cambio en los hábitos de construcción y el uso de nuevas tecnologías, enfocado al desarrollo de la investigación científica y su aplicación en el desarrollo tecnológico, de herramientas y materiales (ASOCEM, 2015).

Por su parte con respecto a los materiales innovadores, éstos se han desarrollado por la necesidad de subsanar necesidades de viviendas, catástrofes y el aumento de los costos en la construcción, algunos de ellos son: madera transparente, hidro-cerámica, hormigón pigmentado, hormigón reforzado con bambú, ladrillos que absorben la contaminación, hormigón auto regenerativo, etc. Tal y como puede verse en el campo de la construcción, la finalidad es la aplicación de la ciencia en el desarrollo tecnológico para la creación de materiales y el perfeccionamiento de técnicas constructivas en beneficio de la comunidad, para el bien social (RAE).

Desafortunadamente en nuestro país, el sector de la construcción en los ámbitos científico e ingenieril; suele ser resistente a los cambios en lo que a la aplicación de nuevas técnicas se refiere, ya que implica un fuerte aprendizaje adicional en el uso de nuevos métodos en la industria de la construcción y lo cual contrasta con los países europeos y asiáticos donde el concreto tradicional también había sido muy utilizado, pero ha ido evolucionando al desarrollo de concretos prefabricados ligeros, que prácticamente son desconocidos en México.

Por lo anterior, mantenerse al margen de la evolución de esta rama de la ingeniería en el mercado mundial, trae consigo una limitación sobre la ciencia detrás del ramo de la construcción y el desarrollo de nuevos y mejores materiales, por lo que es necesario vencer los paradigmas y para ello, se torna indispensable realizar aportaciones científicas y tecnológicas, generando para el mercado mexicano materiales atractivos en aspectos de seguridad, funcionalidad, confort y economía (Izquierdo, 2022).

Debido a lo anterior en la presente investigación, se diseñará la formulación de un tipo de concreto prefabricado ligero llamado concreto celular autoclaveado (por sus siglas en inglés autoclaved aerated concrete "AAC") con su descripción cuantitativa y cualitativa. Del mismo

modo, se evaluará el efecto de la incorporación de aditivos en sus propiedades físicas y mecánicas, con lo cual se pretende de manera adicional disminuir el consumo de agua para su elaboración, incrementando su resistencia y disminuyendo su densidad.

1. ANTECEDENTES

La industria de la construcción es clave en el desarrollo económico de las naciones, pero históricamente, la correlación entre economía y obras es más estrecha debido a que la riqueza siempre estará relacionada con los proyectos de infraestructura, particulares y de vivienda con que cuente un país.

En el último siglo, la construcción ha evolucionado, ya no se utilizan los mismos materiales para los proyectos, además que se han desarrollado nuevos materiales y mejorado los existentes para dar mayores beneficios y alcanzar las grandes obras de ingeniería que podemos ver hoy en día.

En nuestro país, la industria de la construcción es un sector relevante de la economía. Las obras se construyen a lo largo del país y frecuentemente han sido utilizadas como motor de la producción. La construcción siempre ha estado vinculada con el desarrollo del país y ha sido palanca fundamental para lograrlo.

Mientras más obras se construyen, más riqueza se crea, y no solamente eso, también se genera mayor empleo. Por lo anterior, la construcción es una industria que tiene una importante función social. Es el sector de la economía que absorbe la mayor cantidad de mano de obra no calificada del país. A mayor cantidad de obras que se construyen, mayor cantidad de personal empleado (Poo R., 2003).

Tan solo se tienen que ver los edificios alrededor, las banquetas y todas las estructuras que componen las ciudades, es evidente que el concreto está en todas partes. Pero ¿qué hace que este material sea tan importante para la construcción? (México C. S., 2020).

A continuación, se describirá la definición, participación, importancia y evolución del concreto como el material de construcción más importante y más utilizado en el mundo.

1.1 El Concreto

El concreto se define como la mezcla de materiales pétreos, arena, agua y cemento que al solidificarse constituye un material de construcción muy resistente y recibe también el nombre de hormigón (RAE).

De acuerdo con la funcionalidad de sus elementos, el concreto es una mezcla homogénea, “combinación física de dos o más sustancias se unen y que no es posible distinguir una sustancia de otra a simple vista” de componentes fundamentales como lo son: un aglutinante (cemento), un agente activante (agua) y los agregados (conjunto de partículas minerales de diferentes tamaños ligadas por la pasta cementante).

1.1.1 La química del concreto

El concreto, es un material compuesto duradero, fácil de usar y rentable, y para su elaboración utiliza materiales como el cemento.

El cemento, incluye principalmente sílice, óxido de calcio y alúmina, es el ingrediente principal que determina la resistencia del concreto. Muchos investigadores han investigado la estructura y propiedades del cemento. Existen reacciones químicas que ocurren en la producción de concreto, en general, el proceso de hidratación que está en función de las reacciones químicas entre los minerales del cemento, agua, yeso y otros aditivos genera productos son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfo-aluminatos de calcio hidratados ocurre de manera diferente en cada mineral ya sea por la velocidad de reacción, o por los cambios cristalinos experimentados por éstos durante la transformación de fase anhidra a hidratada. Además, la apariencia de la pasta a medida que avanza la hidratación (Giraldo, Mineralogical evolution of portland cement during hydration process, 2006).

Por su parte, los productos de hidratación consisten en hidróxido de calcio (CH), hidrato de silicato de calcio (CSH) y otros compuestos químicos que varían en virtud del componente de Clinker.

Entre los productos hidratados, el gel CSH donde se oxida CaO , SiO_2 y H_2O están simbolizados por los caracteres C, S y H, que dan cohesión al material, es el componente principal del cemento que aglomera los granos de Clinker no hidratados y otros productos de hidratos cristalinos. Se cree que la CSH tiene un gran impacto en la resistencia y la deformación de la pasta de cemento (Wang, Li, Xie, Zhang, & Li, 2024).

De manera general, caracterizar las partículas del cemento es complicado debido a su diminuto tamaño, formas complejas y la presencia de multifases naturales. Por lo cual, para caracterizarlo al igual que a la pasta e identificar sus componentes mineralógicos se usan técnicas como: microscopía electrónica y difracción de rayos X entre otras (Giraldo, Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación, 2006).

Las características de las fases mineralógicas principales del cemento que están presentes en la siguiente investigación, son:

Melilita. Su fórmula general es $\text{Ca}_2(\text{Al},\text{Mg})(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_7$ y puede actuar como precursor de tobermorita en ciertos sistemas cementantes, especialmente en concretos que contienen materiales industriales ricos en Ca y Al como es el caso de ésta investigación.

La melilita, especialmente sus miembros ricos en Ca, Mg, Al y Si, puede transformarse durante la hidratación del cemento o en condiciones hidrotermales (autoclave) en fases secundarias como:

- C-S-H gel
- Tobermorita (cristalizada)
- Etringita o hidrogeles aluminados, dependiendo de las condiciones

De manera concreta, en el proceso de síntesis de AAC, los componentes se someten a curado a vapor a alta temperatura (180–200 °C), lo que favorece la formación de tobermorita a partir de melilita si está presente.

Tobermorita gel (C-S-H o sistema de hidrato de silicato). Es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y hormigones y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados, lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo y será el elemento central de esta investigación.

Portlandita (hidróxido de calcio). Tiene efectos positivos en tanto que es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores, manteniendo a los hormigones armados protegidos contra la corrosión electroquímica.

Etringita (trisulfoaluminato de calcio): Los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión, ya que se trata de la etringita positiva.

1.1.2 Factores que afectan la resistencia a la compresión en el concreto celular autoclaveado

Por su parte, a partir de la síntesis del concreto celular autoclaveado, diversos factores están estrechamente relacionados con las características mecánicas del producto final, los cuales se describen a continuación:

a) La porosidad, caracterizada por la relación sólido/volumen de poros (V_s/V_p), puede considerarse una función lineal de V_s/V_p dentro de un grado razonable de aproximación (Watson, 1980). Además, la forma de los huecos de aire, el factor de espaciado, la distribución del tamaño y la relación de calcio-silicio también influyen (Ma, Jiang, & Liao, 2022).

De acuerdo con (Yang, Zhang, Huang, Chen, & Qiu, 2024) mostraron que la resistencia a la compresión del AAC aumentó con la disminución de la porosidad y el diámetro medio de poro.

b) La densidad seca: aumentar la densidad aparente del material incrementa la resistencia a la compresión.

c) La relación agua/cemento: un aumento elevado de la cantidad de cemento no es beneficioso para la resistencia a la compresión (Chen, Chang, & Lai, 2017).

d) El tipo de agente espumante utilizado afecta directamente el tipo de poro formado en la matriz del material y la resistencia. Además, la resistencia aumenta con la cantidad creciente de hidratos y la disminución de la porosidad. El comportamiento térmico y la distribución del diámetro de los microporos son otras características que influyen en las cualidades mecánicas del material (Narayanan N. &, 2000).

e) Las condiciones de curado: aumentar la presión de la autoclave mejora la formación de la fase cristalina de la tobermorita (Baspinar, Demir, & Kahraman, 2013). Prolongar el tiempo de curado en condiciones de baja presión de vapor es útil para desarrollar mayor resistencia (Chen, Chang, & Lai, 2017). Respecto a la contracción del material, esta disminuye

con la cristalinidad creciente, mientras que la resistencia a la compresión aumenta hasta alcanzar un valor óptimo.

1.1.3 Tipos de concreto

Hay diferentes tipos de concretos con base en la combinación de materiales utilizados para su fabricación y la cantidad de cada uno de ellos y según el tipo de aplicación, se recomendará uno u otro para maximizar su eficiencia, durabilidad y calidad de la estructura final (Vidaud Quintana, 2014).

En conformidad con el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCYC) de manera general, los concretos pueden clasificarse de acuerdo con su resistencia (Tabla 1), consistencia (Tabla 2) y peso volumétrico (Tabla 3) y es conforme a esta información que dependiendo de las necesidades se puede hacer la síntesis del material con las características más convenientes que se demandan (IMCYC, 2019).

En la Tabla 1 (IMCYC, 2019), se presenta la clasificación del concreto en función de su resistencia, y está enfocada a aquellos cuerpos constructivos que requieren soportar una gran carga.

Tabla 1. Clasificación de los concretos de acuerdo con su resistencia.

| TIPO | USOS | INFORMACIÓN TÉCNICA |
|----------------------------------|--|--|
| BAJA RESISTENCIA | <ul style="list-style-type: none"> • Losas aligeradas • Elementos de concreto sin requisitos estructurales | <ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales • Resistencia a la compresión < 150 Kg/cm² |
| RESISTENCIA MODERADA | <ul style="list-style-type: none"> • Edificaciones de tipo habitacional de pequeña altura • Edificaciones sencillas | <ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales • Resistencia a la compresión entre 150 y 250 Kg/cm² |
| NORMAL | <ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de estructuras de concreto | <ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco similares a las obtenidas en concretos convencionales • Resistencia a la compresión entre 250 y 420 Kg/cm² |
| MUY ALTA RESISTENCIA | <ul style="list-style-type: none"> • Columnas de edificios muy altos • Secciones de puentes con claros muy largos • Elementos pre reforzados • Disminución en los espesores de los elementos | <ul style="list-style-type: none"> • Alta cohesividad en estado fresco • Tiempos de fraguado similares a los concretos normales • Altos revenimientos • Resistencia a la compresión entre 400 y 800 Kg/cm² • Baja permeabilidad • Mayor protección al acero de refuerzo |
| ALTA RESISTENCIA TEMPRANA | <ul style="list-style-type: none"> • Pisos • Pavimentos • Elementos pre reforzados • Elementos prefabricados • Construcción en clima frío • Minimizar tiempo de construcción | <ul style="list-style-type: none"> • Se garantiza lograr el 80% de la resistencia solicitada a 1 o 3 días • Para resistencias superiores a los 300 Kg/cm² se requiere analizar el diseño del elemento |

En la Tabla 1, se muestra que la resistencia a la compresión para los elementos de esta tabla, fluctúa entre 150 y 800 Kg/cm² exceptuando los concretos de **baja resistencia** que pueden tener valores <150 Kg/cm², el cual es un valor aceptable para el concreto celular autoclaveado enfocando su uso en losas aligeradas, como lo señala la tabla en el primer recuadro.

En la Tabla 2 (IMCYC, 2019), se presenta la clasificación del concreto en función de su consistencia, está enfocada a los cuerpos que requieren ser colados en sitio, con un fraguado por etapas y por lo tanto el parámetro de control más relevante es la fluidez y revenimiento del material.

Tabla 2. Clasificación de los concretos de acuerdo con su consistencia.

| TIPO | USOS | INFORMACIÓN TÉCNICA |
|------------------------------|---|--|
| FLUIDO | <ul style="list-style-type: none"> • Rellenos • Estructuras con abundante acero de refuerzo • Bombeo a grandes alturas | <ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento superior a 19 cm, es decir tiene una consistencia fluida • Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales |
| NORMAL O CONVENCIONAL | <ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de estructuras de concreto | <ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento entre 2.5 y 19 cm, lo cual considera las zonas de consistencia semi fluida /12.5 a 19 cm, plástica / 7.5 a 12.5 cm, semi plástica 2.5 a 7.5 cm • Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales |
| MASIVO | <ul style="list-style-type: none"> • Colados en elementos de gran dimensión | <ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento entre 2.5 y 5 cm • Resistencia a la compresión igual a las logradas por los concretos convencionales |
| SIN REVENIMIENTO | <ul style="list-style-type: none"> • Concretos que no se colocan bajo los métodos convencionales | <ul style="list-style-type: none"> • Revenimiento de 2.5 cm • Resistencia a la compresión máxima de 150 kg/cm² |

En la Tabla 2, se muestra que por ser el concreto celular autoclaveado, al ser un elemento prefabricado, no experimenta revenimiento, por lo que queda posicionado en los elementos de la última fila de la tabla.

Finalmente, en la Tabla 3 (IMCYC, 2019), se presenta la clasificación del concreto en función de su peso volumétrico. Está enfocada a los cuerpos que requieren ser colados en sitio, con un fraguado por etapas y por lo tanto el parámetro de control más relevante es la fluidez y revenimiento del material.

Tabla 3. Clasificación de los concretos de acuerdo con su peso volumétrico.

| TIPO | USOS | INFORMACIÓN TÉCNICA |
|---|--|--|
| LIGERO CELULAR (ALTA TRABAJABILIDAD) | <ul style="list-style-type: none"> • Capas de nivelación en pisos y losas | <ul style="list-style-type: none"> • P.V. de 1,500 a 1,920 kg/m³ • Resistencia a la compresión de hasta 175 kg/cm² a los 28 días |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Para construcción de vivienda | <ul style="list-style-type: none"> • Conductividad térmica de 0.5 a 0.8 kcal/m²hoC |
| NORMAL | <ul style="list-style-type: none"> • Todo tipo de estructuras en general | <ul style="list-style-type: none"> • Propiedades en estado fresco y endurecido similares a las obtenidas en los concretos convencionales |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Elementos prefabricados • Estructuras voluminosas | <ul style="list-style-type: none"> • P.V. entre 2,200 y 2,400 kg/m³ • Resistencia a la compresión entre 100 y 350 kg/cm² |
| PESADO (MEJOR RELACIÓN RESISTENCIA/PESO) | <ul style="list-style-type: none"> • Estructura de protección contra radiaciones | <ul style="list-style-type: none"> • P.V. entre 2,400 y 3,800 kg/m³ • Resistencia a la compresión igual a la obtenida en los concretos normales |
| | <ul style="list-style-type: none"> • Elementos que sirven como lastre | |

En la Tabla 3, se muestra que en el primer recuadro es donde tiene cabida el AAC como un tipo de concreto ligero celular (alta trabajabilidad), aunque su densidad es inferior a los 1500 kg/m³, es utilizado para construcción de vivienda como losa de entrepiso y losa de azotea, ofreciendo también valores inferiores a 0.5 kcal/m²h°C.

Considerando que, en la actualidad se buscan elementos más ligeros en la construcción, es importante mencionar que el factor de peso volumétrico es un parámetro negativo debido a que hay numerosas ventajas al tener materiales con baja densidad, por ejemplo: reducción de las cargas muertas, mayor rapidez de construcción y menores costos de transportes y acarrees (IMCYC, 2019).

Para alcanzar la meta de la disminución de la densidad del concreto, es necesario aligerar el peso del concreto tradicional, sustituyendo las materias primas del concreto por unas de menor peso obteniendo un concreto con una densidad que oscila entre 1,400 Kg/m³ y 2,000 Kg/m³.

Para lograr esta meta, se enfocaron los esfuerzos científicos para hallar la mejor manera de aligerar el concreto. ¿Cómo se logra aligerar el concreto?.

1.1.4 Los concretos aligerados

Al hablar de un concreto ligero, puede decirse que es una mezcla perteneciente a la familia de los hormigones. Este tipo de hormigón, a diferencia del tradicional, sustituye la grava por agregados mucho más ligeros, lo cual además de disminuir la densidad, produce por la presencia de vacíos en el agregado y otorga propiedades de aislamiento acústico y térmico. Así mismo, uno de los principales retos en el diseño del concreto aligerado es adaptar las normas de producción y ejecución, ya que a menudo se desvían del hormigón de peso normal dado que los vacíos ocasionan la disminución en la resistencia del concreto, por lo que no es la condición predominante para los concretos y es necesario buscar alternativas para contrarrestar este efecto (Huerta, 2009).

En lo referente a su manufactura, existen 3 maneras de obtener concreto u hormigón aligerado:

1. Eliminando los elementos finos de la mezcla

Con este método, se elimina o reduce la cantidad de arena de la mezcla, de modo que los espacios o poros que ocupaba la arena se conviertan en micro burbujas de aire, así se puede obtener un hormigón aligerado a pesar de usar áridos tradicionales como la grava.

2. Áridos ligeros de baja densidad

Se añaden a la mezcla áridos naturales o artificiales mucho más ligeros que la grava (como puzolana, vidrio expandido, vermiculita, sinterizados, arcilla sinterizada), con un tamaño de entre 10 a 20 milímetros. Es importante tener en cuenta que éste tipos de áridos absorben mayor cantidad de agua, y muchos tienen tendencia a flotar dentro de la mezcla, por lo que, este tipo de hormigones ameritan de un compactado más intenso.

3. Añadiendo burbujas de gas

A este tipo de hormigón se le conoce como hormigón celular y se dividen en dos categorías: los espumados y los gaseados. En los espumados, se obtienen burbujas dentro de la mezcla agregando una sustancia espumosa, mientras que los gaseados si obtienen a través de un aditivo que produce burbujas de gas en el interior gracias a que produce una reacción química con el cemento (Structuralia, 2022).

Sea cual sea el método seleccionado para la producción de concretos porosos, la característica principal es su alta permeabilidad dado el alto contenido de vacíos, lo que resulta en una naturaleza liviana, la que hace que el hormigón poroso sea muy útil desde el punto de vista medioambiental y económicamente rentable (F.M., S., & Montes, 2006) (Razak, Abutaha, & Ibrahim, 2017).

Sin embargo, la característica principal de este tipo de concretos es su alta permeabilidad lo que resulta en una menor resistencia y desempeño estructural más variable en comparación con el concreto tradicional, por lo que se vuelve indispensable buscar opciones que permitan mejorar sus propiedades físicas y mecánicas (Xu, Shen, Huo, Yang, & Huang, 2018) (Crouch, Pitt, & Hewitt, 2007).

Retomando el tipo de concreto gaseado, a continuación, se definirá y detallará información relacionada con el AAC, tema central del presente trabajo.

1.1.5 El concreto celular autoclaveado

En primer lugar, como se mencionó en el párrafo anterior, se definirá al concreto celular autoclaveado como un material de construcción poroso gaseoso y ecológico elaborado a partir de materias primas naturales, tales como: arena sílica, cemento, cal, yeso, polvo de aluminio y agua. Esta combinación crea un concreto estructural aireado y ligero, acústico, térmico e ignífugo.

Cada una de las materias primas, realiza una función importante de la formación del AAC por ejemplo se suele añadir yeso o anhídrita con función de agente regulador en el proceso de gasificación, ya que actúa sobre la velocidad de endurecimiento de la lechada y sobre el proceso de hidratación de la cal viva.

La estructura celular del producto final se obtiene mediante la adición de una pasta o polvo de aluminio, lo que conduce a la formación de pequeñas burbujas de hidrógeno en la suspensión (Shan, Yang, Su, Rajan, & Zhou, 2022).

Para hablar acerca de su historia, se debe mencionar que el concreto celular autoclaveado (por sus siglas en inglés, autoclaved aerated concrete "AAC"), se produjo por primera vez en Suecia en la década de 1930 bajo el nombre de hormigón celular curado en autoclave (Kamal, 2020) (Wittmann, 1992).

En 1880 al investigador, Michaelis, se le concedió una patente en su proceso de curado con vapor. El Checo Hoffman prueba exitosamente y patenta en 1889 el método de "aireación" del concreto por dióxido de carbono. Aylsworth y Dyer, utilizaron polvo de aluminio e hidróxido de calcio para lograr una mezcla de cemento poroso, por la cual también recibieron una patente en 1914. El investigador Axel Eriksson dio un serio paso adelante hacia el desarrollo del concreto celular autoclaveado, también conocido por sus siglas en inglés AAC moderno cuando en 1920 patentó los métodos para hacer una mezcla aireada de piedra caliza y pizarra (una denominada "fórmula de cal").

Por otra parte, a lo largo de su existencia, el AAC ha ido ganando una mayor participación en el mercado internacional de la construcción y hoy mantiene su reputación como el material ligero de construcción del futuro (Wittmann, 1992) (Van Boggelen W. , 2014).

Cabe mencionar que su ligereza deriva directamente de la microestructura del material, que se caracteriza por una alta porosidad total, hasta el 85% de la fase endurecida en volumen, como se muestra en la Figura 1.

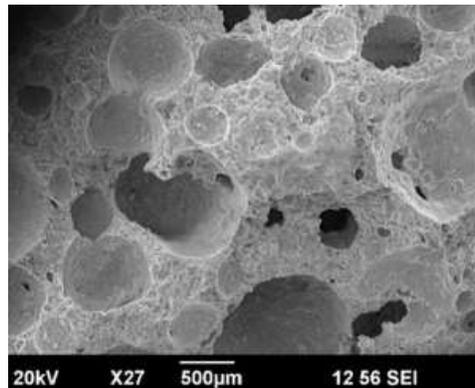
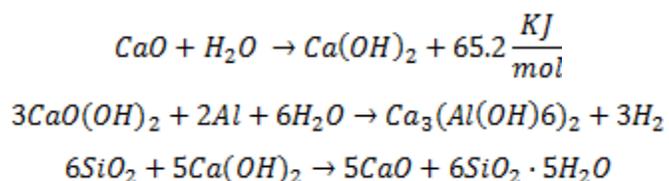


Figura 1 Estructura porosa de AAC, basada en inspección visual y a partir de resultados de un microscopio electrónico de barrido (MEB) (Michelini, Ferretti, & Miccoli, Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments, 2023).

En la Figura 1, podemos observar que Los poros de aire tienen una forma casi esférica, con un diámetro generalmente variable entre 0,5 y 3mm, y una distancia mutua que oscila entre cero (poros interconectados o adyacentes) y 1 mm (Michelini, Ferretti, & Miccoli, Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments, 2023).

1.1.5.1 La química del concreto celular

La combinación del cemento, cal, yeso, arena sílica y el polvo de aluminio causa la expansión de la mezcla. De manera simplificada las reacciones químicas que se llevan a cabo en el concreto celular se pueden expresar de la siguiente manera:



Finalmente, la tobermorita puede expresarse químicamente como: $Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot nH_2O$ y como puede observarse al entrar en contacto el óxido de calcio y el agua se produce una reacción exotérmica que genera una liberación de calor de aproximadamente 65.2 KJ/mol.

1.1.5.2 El impacto científico del concreto celular autoclaveado en la construcción.

Con el descubrimiento de la tobermorita 11Å en el año de 1880 por el mineralogista escocés Mathew Forster Heddle como componente fundamental del concreto celular autoclaveado, se determinó que es capaz de brindar dos principales atributos (Van Boggelen W. , 2014):

El material endurecía rápidamente gracias al proceso de alta presión en autoclave, por lo que el proceso tradicional de curado es irrelevante.

Por su parte, la contracción estuvo casi ausente después del proceso de curado con vapor en comparación con el curado al aire normal.

No obstante, el concreto celular autoclaveado, se destaca por su insuficiente y variable resistencia a la compresión en comparación con el concreto tradicional y su alta absorción de agua, lo que genera problemas durante la construcción (Ghasem, 2019).

Por esta razón, ha sido necesario generar a lo largo del tiempo, propuestas de formulaciones que incrementen la resistencia del material y proporcionen beneficios adicionales. Y es por ello, que el concreto celular autoclaveado, ha sufrido diversas experimentaciones en la incorporación de aditivos o en sustituciones totales y/o parciales de las materias primas que lo conforman para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del producto final.

Es importante mencionar que la selección adecuada de las materias primas, la dosificación precisa, las densidades de los materiales, las temperaturas de los materiales, la cantidad de agua, la presión, la velocidad y el tiempo en las diferentes etapas son cruciales para controlar y optimizar el producto.

Así mismo, a menudo, para la formulación del AAC se desconoce la importancia de la configuración óptima, lo que conduce a un rendimiento sub-óptimo de las plantas. Las mejoras en esas áreas resultan directamente en ahorro económico, mejora de la calidad del producto, reducción de desperdicios e incluso mayores volúmenes de producción por ciclo.

1.1.5.3 Aportaciones científicas enfocadas a la mejora de las propiedades del AAC

Mustafá en el año 2007, realizó la evaluación del efecto de la zeolita como un reemplazo de cuarcita en las mezclas convencionales obteniendo una significativa reducción de la conductividad térmica del material, pero logrando una resistencia insuficiente a la compresión de 1.22-3.44 N/mm² o bien 12-34 kg_f/cm² (Mustafa, 2007).

Posteriormente, Kurama et. al. en el año 2009, realizaron el estudio de las propiedades del AAC producido a partir de cenizas de carbón generadas en una Planta de energía térmica en Turquía, descubriendo con ello que esta incorporación producía la disminución del peso unitario en el AAC (Kurama & Topçu, 2009).

Después, en el año 2014, se realizó una investigación sobre el incremento de la fuerza de un 20% de compresión en el concreto celular autoclaveado mediante la adición de fibras de basalto y polvo de dióxido de silicio dentro de ciclos recurrentes de calentamiento y enfriamiento, pero no se alcanzó el objetivo proyectado (Sinica, 2014).

Posteriormente en la investigación de (Walczak, Malolepszy, Reben, & Szymansky, 2015), se tuvo como objetivo diseñar un concreto aireado autoclaveado (AAC) mediante la sustitución parcial de arena sílica con desechos de vidrio como una alternativa de agregados finos para

proyectos de vivienda masiva con el objetivo de incrementar la resistencia a la compresión, sin dejar de lado la importancia del cuidado del medio ambiente mediante la utilización de materiales de desecho vítreos.

Durante el mismo año 2015, (Kudiakov & Prischepa, 2015), investigaron la adición de aditivos orgánicos y minerales porosos en el concreto celular autoclaveado con el fin de incrementar las propiedades físicas y mecánicas del producto, obteniendo un aumento de un 20% para la fuerza de compresión.

Al siguiente año, (Rózycka & Pichor, 2016), realizaron una investigación acerca del efecto de residuos de la perlita en el concreto celular autoclaveado, en la cual se demostró una mejora en la disminución del valor de coeficiente de conductividad térmica, pero no en la resistencia a la compresión, puesto que el resultante disminuyó un 20%.

Esto debido a que la perlita al ser una roca volcánica amorfa alumino-silíceo de origen natural, cuando se calientan a una temperatura superior a los 870 °C, se expanden y se transforman en un material celular de baja densidad aparente. Tras un calentamiento rápido, el agua contenida dentro de la perlita se vaporiza y crea burbujas en la roca ablandada por el calor produciendo una microestructura similar a la espumosa.

Durante el mismo año, fue trabajo de investigación la adición de aditivos orgánicos y minerales porosos en el concreto celular autoclaveado con el fin de incrementar las propiedades físicas y mecánicas del producto, obteniendo un aumento de un 20% para la fuerza de compresión.

Por otra parte, (Ren Di, y otros, 2020) investigaron la mejora de las propiedades reológicas del concreto celular autoclaveado mediante la reducción del consumo de agua con la incorporación de cenizas volantes demostrando también que la incorporación de super plastificantes de poliacrilato tiene un efecto positivo en las propiedades físicas de la muestra.

Asi mismo, (Taban, Schober, Heinz, & Seifert, 2021) investigaron las propiedades mecánicas y micro estructurales del hormigón celular esterilizado en autoclave (AAC) que contiene tierra de diatomeas calcinadas como principal fuente de sílice. En éste mismo año, (Peng, Liu, &

Zhana, 2021), realizaron el estudio de la viabilidad en la preparación de concreto celular autoclaveado mediante el uso de grafito como fuente alternativa de sílice, obteniendo una resistencia a la compresión máxima de 5MP, pero sacrificando la densidad del material con un valor elevado de hasta 750kg/m³ y 15% de dosificación de cemento (Taban, Schober, Heinz, & Seifert, 2021).

En el año 2022, (Gencel, y otros, 2022) abordaron el tema y trataron de reducir la conectividad de la red de poros, utilizando perlita expandida y arena de vidrio en las mezclas de concreto, donde la adición de perlita expandida aumentó las propiedades aislantes del hormigón celular debido a su alta porosidad. Esto, debido a que el alto contenido de cemento Portland, así como su muy alta porosidad, hacen que el concreto celular sea propenso a problemas de durabilidad física, como la contracción por secado, al permitir la entrada de productos químicos y agua libre a los poros del hormigón.

En China, el año 2022 (Jiang, y otros, 2022), realizaron un estudio del rendimiento y características de hidratación del AAC a base de escoria del horno de oxígeno básico (por sus siglas en inglés, BOF) donde se obtuvieron resultados positivos en la disminución de la densidad aparente sin reducir el rendimiento mecánico. Sin embargo, se enfocó principalmente desde el punto de vista ecológico al hacer uso del subproducto de la fabricación del acero altamente producido en la industria.

En este año, Vijay et. al, se estudiaron el impacto de la incorporación de escoria de alto horno granulada molida con cenizas volantes en el AAC con la intención de mejorar sus propiedades mecánicas pero teniendo un impacto negativo en la densidad, al incrementarse (Vijay, y otros, 2022).

Por otra parte, tal y como lo mencionaron en el año 2023 (Michelini, Ferretti, & Miccoli, Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments, 2023) la resistencia a la compresión disminuye al disminuir el espesor de las paredes de los poros, lo que a su vez depende de la distancia mutua entre los poros. La

resistencia a la compresión está estrictamente relacionada con la cantidad y el grado de cristalinidad de los productos hidratados finales (principalmente una forma estable de tobermorita 11Å) y, en consecuencia, depende del tipo y proporción de las materias primas utilizadas en el proceso de producción, la dosis de agua, así como así como las condiciones de autoclave (en términos de duración, presión y temperatura).

Es de gran importancia mencionar que, en el mes de septiembre de 2023, se estableció la hoja de ruta que marcará el camino para que los productos de AAC alcancen emisiones netas cero para 2050, con el potencial de volverse carbono negativo, absorbiendo así más dióxido de carbono de la atmósfera del que producen, el AAC tendrá un papel importante que desempeñar como material de construcción ayudando a reducir las emisiones del ciclo de vida de los edificios (Turski, Kreft, & Fudge, 2023).

Es importante mencionar que en la actualidad, el tema del concreto celular ha seguido manteniendo el interés científico alrededor del mundo por lo que en el año 2025, (Xie, y otros, 2025) mencionaron la posibilidad de mejorar las propiedades del AAC mediante la incorporación de piedra de granito y escoria de acero logrando un aumento en la resistencia a la compresión pero sin alcanzar los 4MPa mínimo para un sistema estructural mexicano.

Las experimentaciones realizadas hasta este momento, no han abarcado todas las posibilidades de mejora estructural en este material, pero si han marcado la pauta para conocer las variables que tienen mayor impacto en las propiedades mecánicas del material.

Como se ha expuesto en los párrafos anteriores, en los últimos años los investigadores se han interesado por profundizar en el conocimiento del concreto celular autoclaveado buscando las mejores alternativas para su posible uso estructural. Y algunos de ellos han logrado el aumento de resistencias a la compresión mediante la incorporación de aditivos o la sustitución de las materias primas, pero sacrificando la densidad del AAC.

Aún hay mucho campo para explorar en lo que respecta a la mejora del AAC como material estructural ya que hasta el momento no se han logrado potenciar los beneficios adicionales,

aumentar la resistencia estructural del material y optimizar el consumo del agua de manera simultánea.

Por lo anterior, el presente trabajo tiene la finalidad de lograr una síntesis aditivada que además de ser estructural, sea sustentable, económicamente viable pero además que sea de implementación industrial y no solamente a nivel laboratorio, algo que hasta el momento ninguno de los trabajos realizados anteriormente ha logrado.

2.MARCO TEÓRICO

2.1 Historia del concreto

Desde que el hombre dejó su vida nómada y se convirtió en sedentario, tuvo la necesidad de construir refugios que pudiesen protegerlo de las condiciones climáticas y del entorno de la naturaleza. Fue entonces que enfocó su esfuerzo en el desarrollo y construcción de una vivienda cómoda y segura. Posteriormente, se levantaron construcciones con requerimientos específicos como muros y estructuras defensivas.

De acuerdo con algunas investigaciones, los hallazgos más antiguos de los que se tiene conocimiento sobre el uso de mezclas cementantes datan de los años 7000 y 6000 a. C. cuando en las regiones de Israel y la antigua Yugoslavia respectivamente, se encontraron vestigios de los primeros pisos de concreto a partir de calizas calcinadas. Cerca al año 2500 a. C., se emplearon mezclas de calizas y yesos calcinados para pegar los grandes bloques de piedra que se utilizaron para la construcción de las pirámides de Giza en Egipto (Fernández, 2020).

En el Mediterráneo occidental, cerca del año 500 a. C., los griegos adoptaron el arte de hacer concreto y más tarde, en el año 300 a. C. la civilización romana copió algunas técnicas para construir varias de sus obras, entre ellas el foro romano. Durante el siglo 11 a. C. en la población de Pozzuoli, mezclando caliza calcinada con finas arenas de origen volcánico se desarrolló el cemento puzolánico (Gómez, 2016).

Esta mezcla fue empleada para la construcción del teatro de Pompeya en el año 75 a. C. También se sabe que, utilizando rocas de origen volcánico como agregado liviano y jarrones de barro incrustados para aligerar el concreto, se construyó el coliseo romano y el domo del

panteón con 50 metros de diámetro. Con la caída del Imperio romano, el uso del concreto desapareció y fue recuperado por los ingleses hacia el año 470 d. C.

Desde que el imperio romano cayó, la utilización de cementantes no tuvo gran cambio. Fue hasta el siglo XVIII cuando los ingleses ocuparon este tipo de materiales para rehabilitar el “Faro de Adystone”, de igual manera se sabe que en Vicant, alrededor de 1817 se dio a conocer el proceso de producción de cemento. Sin embargo, quien obtuvo la patente para fabricarlo en 1824 fue Joseph Aspidín (Gómez, 2016).

A partir de 1900, comienza la carrera por la construcción de edificaciones que ejemplificaría la majestuosidad y poder de las naciones, para lo cual los métodos de construcción y materiales empleados evolucionaron en gran medida. Alrededor del mundo, se desarrollaron procesos para minimizar tiempos de fabricación, creándose entonces la tecnología de los prefabricados, lo que implica una reducción importante de costos.

La necesidad de contar con materiales de construcción que cumplan las normas de calidad en la construcción, que sean amigables con el medio ambiente y que ofrezcan facilidad y bajo costo de instalación, se han vuelto temas relevantes (González, 2015).

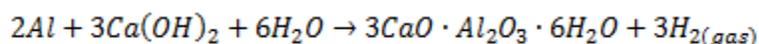
El estudio de los materiales de construcción alternativos ha aumentado de manera significativa en la última década y una de las principales razones es la importancia que ha adquirido la concientización acerca de la reducción de los contaminantes generados durante el proceso de elaboración e instalación (Xiaoling-Qu, 2017).

2.2 El concreto celular autoclaveado y su química

El concreto aireado autoclaveado (AAC) está hecho de arena sílica, cal, cemento y yeso con trazas de polvo de aluminio como agente formador de poros. Estos componentes se mezclan con grandes cantidades de agua y se moldean para producir un cuerpo verde celular mediante

la generación de gas H_2 a presión atmosférica y luego se esterilizan en autoclave a $200^\circ C$ bajo presión de vapor saturado durante varias horas (Cruz-Palafox, 2018).

De manera simultánea, el aluminio reacciona con hidróxido de calcio o álcali, que libera hidrógeno gaseoso y forma burbujas, reacción directamente relacionada con la formación de tobermorita. La velocidad a la que se forman las burbujas de aire es fundamental para el éxito del producto de hormigón aireado final, como puede verse en la ecuación siguiente (Kurama & Topçu, 2009).



En el caso específico del concreto celular autoclaveado, éste se concibió inicialmente como un buen material aislante, lo que ha generado un interés renovado en sus características estructurales debido a su peso más ligero y se ha utilizado ampliamente en aplicaciones de construcción. En comparación con los materiales de construcción convencionales, el AAC ofrece una menor densidad, menor conductividad térmica, menor contracción, mayor resistencia al fuego y mayor factibilidad en la construcción (Pawel Walczak, 2015).

2.2.1 El AAC como el resultado de un proceso de síntesis

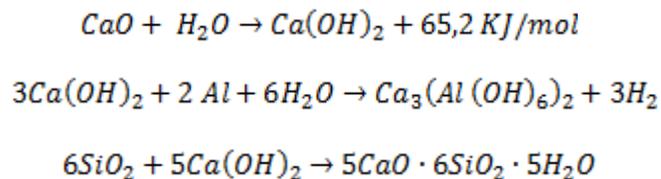
Por definición, la síntesis se describe como un proceso llevado a cabo para obtener un compuesto a partir de otras sustancias más simples conocidas o precursores químicos y en lo referente al concreto celular autoclaveado, los precursores químicos a: la arena sílica (SiO_2), la cal (CaO), el yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), el cemento, el agua (H_2O) y el polvo de aluminio (Al) siendo los productos resultantes fases minerales de tobermorita ($Ca_5Si_6O_{16}(OH)_2 \cdot nH_2O$) en su mayoría e hidrógeno (H_2) (Definicion.DE, 2018).

De acuerdo con las características químicas del concreto celular autoclaveado (AAC) y mediante la aplicación de difracción de rayos X para la identificación de fases minerales

resultantes, se ha confirmado como se mencionó en el párrafo anterior, que el material dominante es la tobermorita, perteneciente al grupo de hidratos de silicato de calcio que se presenta en la naturaleza formado en un ambiente alcalino bajo condición hidrotermal (Renman & Renman, 2012).

Es importante mencionar que los hidratos de silicato de calcio son componentes clave en los minerales de cemento y se han sugerido como sólidos precursores para el crecimiento de minerales estables como es el caso de la tobermorita (Shaw S, 2000).

La química simplificada de las reacciones que ocurren dentro del proceso de síntesis del concreto celular, se expresa de la siguiente manera (Van Boggelen W. , 2014).



El producto principal del AAC, es una mezcla de tobermorita cristalina, semi-cristalina y casi amorfa, es decir, un material con un grado variable de cristalinidad (Narayanan N. R., 2000). Sin embargo, al tratarse de un proceso inicial de hidratación del cemento, estarán presentes los minerales anhidros como: alita, belita, celita y felita, así como las fases estables hidratadas posteriores: tobermorita, portlandita, etringita, etc (Giraldo, Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación, 2006).

De acuerdo con Diez García, Martha, la tobermorita es una familia de minerales o fases cristalinas y hay más de una tobermorita: tobermorita 9Å, tobermorita 11Å (que es la fase que se pretende obtener) y tobermorita 14Å, que se distinguen por tener pequeñas diferencias en su estructura y composición. En todos los casos, están formadas por cadenas dobles de óxido de silicio atrapadas entre láminas de óxido de calcio (Diez, Gaitero, & Dolado, 2017).

Las fases de tobermorita pueden clasificarse en función de sus diferentes espaciamientos basales, que están relacionados con sus grados de hidratación. La riversideíta, más comúnmente llamada tobermorita 9 Å, tiene la fórmula química $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$; la tobermorita

11 Å es más hidratada, con una composición química que va desde $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{17}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ hasta $\text{Ca}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$; y finalmente la tobermorita 14 Å, también conocida como plombierita, es la fase más hidratada del grupo, con la fórmula química $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2\cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Estas tres fases diferentes se caracterizan por espaciamientos basales de 9,3, 11,3 y 14 Å, respectivamente (Bonaccorsi & Merlino S. & Kampf, 2005).

En la figura 2 se presenta esquemáticamente la diferencia entre los 3 tipos de tobermorita.

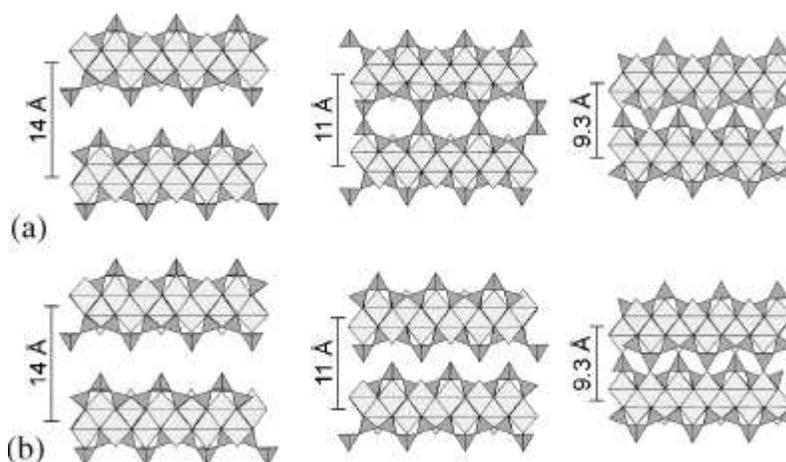


Figura 2 (a) Representación esquemática de las fases estables con espaciamiento basal y contenido de H_2O decrecientes, correspondientes a tobermorita de 14 Å (con cadenas simples de silicato), tobermorita de 11 Å (cadenas dobles) y tobermorita de 9 Å. (Bonaccorsi & Merlino S. & Kampf, 2005).

Como puede observarse en la figura 2, la diferencia entre los 3 tipos de tobermorita radica en el espaciamiento basal entre los 3 tipos de tobermorita y el contenido de agua en cada una de ellas.

La tobermorita 11Å tiene varias aplicaciones industriales como son adición para cementos y para la captura de ciertos contaminantes. Sin embargo, el interés científico se debe a que el componente de la matriz de cemento (denominado gel C-S-H) es una versión poco ordenada de la tobermorita 11Å y se ha encontrado que algunos de los hormigones y morteros de construcciones de la época romana contenían cristales de tobermorita 11Å, confiriéndoles la durabilidad que hasta hoy los mantiene en pie (Diez, Gaitero, & Dolado, 2017).

Al igual que en el concreto tradicional, en el concreto celular autoclaveado, es de suma importancia hallar los componentes claves que permitan una mejora de sus propiedades y permitan su mejor aprovechamiento en el campo de la construcción.

2.3 Los aditivos, alternativa para la mejora del concreto

2.3.1 Aditivos

Desde la antigüedad, los antiguos romanos, durante su imperio experimentaron con los aditivos en el concreto utilizando sustancias como sangre y leche de animales para mejorar las propiedades mecánicas. Los primeros antecedentes del empleo de aditivos químicos en el concreto se remontan al siglo XIX, tiempo después de que Aspidín patentara el Cemento Portland en Inglaterra, en 1824 de acuerdo con la Real Academia Española (por sus siglas, RAE).

A partir de 1905 se comenzaron a utilizar los fluatos o fluosilicatos como endurecedores de superficie y desde 1909 se descubre la acción retardadora del azúcar y en 1929 el mismo efecto proporcionado por el óxido de zinc. Y no fue sino hasta principios de la década de los años 30, en Estados Unidos comenzaron a utilizarse en fábricas de cemento sustancias orgánicas de naturaleza aceitosa, grasa o resinosa; mismas que eran empleadas como dispersantes para modificar la superficie del cemento obtenido evitando la aparición de pequeñas burbujas de aire en el material.

La introducción de los aditivos químicos en el mercado de la construcción tuvo lugar en la década de los años cincuenta, de manera lenta pero progresiva; pero no fue sino hasta la década de los años 60 que se inició el uso masivo de los aditivos plastificantes, productos que hoy en día son de los más utilizados en todo el mundo.

Finalmente, fue en 1962, cuando los aditivos normados atendían a mejoras en la resistencia, trabajabilidad y la American Society for Testing and Materials (ASTM) extendió la normativa de clasificación, normalizando a estos productos de acuerdo a la función (Vidaud Quintana, 2014).

En la actualidad, los avances recientes que se han producido en la tecnología del cemento y el hormigón están relacionados con el uso de aditivos. Los aditivos son productos inorgánicos u orgánicos que, cuando se agregan en pequeñas cantidades, modifican algunas propiedades de los materiales triturados, secos o dispersos en agua.

La gran cantidad de productos propuestos como aditivos y los diversos efectos que cada uno de ellos puede producir dificultan su clasificación.

Estos productos generalmente se subdividen en aditivos para cemento y aditivos para hormigón. Los primeros se utilizan para mejorar el proceso tecnológico de producción de cemento; estos últimos modifican propiedades particulares del hormigón, reduciéndolas o mejorándolas.

Sin embargo, esta subdivisión no es estricta ya que el mismo aditivo puede usarse en cemento y concreto para diferentes propósitos. Un segundo criterio de clasificación subdivide los aditivos según la función principal que tienen (Ye, Zhu, Pan, & Chen, 2024).

Para el caso específico del concreto, los aditivos que se suman en pequeñas proporciones al concreto mediante el mezclado en porcentajes entre 0.1% al 5% cambian significativamente las propiedades del hormigón para alcanzar los objetivos (Kujawa & Olewnik-Kruszkowska, 2021).

Por lo tanto, se sabe que la dosificación de un aditivo en la mezcla del concreto tradicional en estado fresco está directamente relacionada a las propiedades de trabajabilidad y consistencia que se quieren lograr, y varían según el requerimiento del elemento para el que haya sido diseñado y el concreto celular no es la excepción para esta mejora (Niño, 2010).

2.4 Aditivos para el concreto celular autoclaveado

De manera inicial, comprender que las materias primas y el diseño de la fórmula es fundamental para fabricar productos de alta calidad a un costo optimizado en las plantas modernas de AAC, se logra con el conocimiento del proceso químico y se puede optimizar aún más con aditivos químicos.

Durante décadas, los aditivos y plastificantes se han utilizado en la industria del hormigón para aumentar la eficiencia de producción y el rendimiento del hormigón. Sin embargo, la producción de AAC es un proceso químico bastante específico y delicado y los aditivos de uso común de la industria del hormigón no son adecuados para la producción de AAC ya que el proceso químico tiene requisitos diferentes.

El uso de aditivos diseñados específicamente para AAC es una necesidad para optimizar el proceso de producción. Las funciones del aditivo específico para AAC, deben permitir la reducción de cemento y cal, mejorando la estabilidad y resistencia de la torta, así como mejorando la distribución de los poros.

Es por ello que, en el presente trabajo, se evaluará el impacto de 3 diferentes aditivos en la mezcla de AAC, los cuales se mencionan a continuación:

a) Los lignosulfonatos

En los años 50's aparecen los primeros aditivos reductores de agua, basados en lignosulfonatos (lignosulfonates, por sus siglas en inglés "LS"), los cuales pueden definirse como polímeros orgánicos biodegradables de origen natural que se obtienen mediante el proceso de separación de la celulosa y la lignina de la madera, en otras palabras, son compuestos orgánicos que se extraen de la madera (ANFAH, 2005).

Los lignosulfonatos de sodio (Sodium lignosulfonates, por sus siglas en inglés "SLS"), al ser altamente solubles en agua, tienen una amplia gama de usos, como alimento para animales, pesticidas, surfactantes, aditivos en la extracción de petróleo, estabilizadores en suspensiones coloidales y como plastificantes en aditivos para concreto (Zhu, Zhang, & Pan, 2011).

En este último caso, se utilizan como aditivo plastificante en la industria de concretos tradicionales, permite mejorar su trabajabilidad y reducir sensiblemente la cantidad de agua en el amasado, lo que provoca una mayor y más rápida resistencia mecánica del producto fraguado que, además, resulta menos permeable más homogéneo y estético (Industries, 2020).

Por lo antes expuesto, los lignosulfonatos de sodio han sido seleccionados como un posible aditivo del concreto celular autoclaveado mejorador de las propiedades físicas y mecánicas mediante la reducción de agua.

b) La diatomita

La diatomita es una roca silíceas de origen sedimentario, inerte y de baja toxicidad que presenta pequeñas cantidades de compuestos inorgánicos asociados, como aluminio, hierro, amonio, metales alcalinos y otros constituyentes menores. También está formado por silicatos de aluminio cristalinos de estructura tetraédrica enlazados entre sí, que comparten átomos de oxígeno. La estructura celular elemental consta de moléculas tetraédricas de SiO_4 y AlO_4 dispuestas de tal manera que cada átomo de oxígeno se distribuye entre dos tetraedros adyacentes (Hernández-Ávila, y otros, 2017).

La diatomita posee algunas de las propiedades bien valoradas para la síntesis del concreto celular autoclaveado como son: Color por lo regular blanco brillante (en el caso de alta pureza), Alta porosidad, Volumen de muy baja densidad, Muy alta capacidad para absorber líquidos (absorbe hasta 150% de su peso en agua), Conductividad térmica y eléctrica muy baja, Alta resistencia a la temperatura (Punto de fusión entre $1,400^\circ\text{C}$ a $1,750^\circ\text{C}$), Químicamente inerte y $\text{pH} \sim 7.0$ (Sharma & Sharma, 2020).

Por otra parte, la diatomita ha sido utilizada en combinación con residuos de construcción para la formación de materiales estructurales, ofreciendo resultados de resistencia bastante similares o incluso superiores a los presentados por materiales comerciales. Por esta razón, la diatomita en este trabajo de investigación será evaluada como posible aditivo del concreto celular autoclaveado con la finalidad de disminuir la densidad de diseño y aumentar la resistencia a la compresión (Serralde-Lealba, 2021).

c) *Perlita*

La perlita se ha utilizado ampliamente como material agregado liviano en concreto ya que, en su forma expandida ofrece aislamiento térmico, resistencia al fuego y otras propiedades deseables cuando se usa en yeso a base de cemento portland o yeso (Singh, 1991).

En primer lugar, las investigaciones estructurales y microestructurales mostraron que los desechos de perlita expandida tuvieron una influencia positiva en la formación de la tobermorita en AAC. A partir de este resultado, se concluyó que los residuos de perlita expandida pueden utilizarse potencialmente como reemplazo de la arena de cuarzo en la producción de AAC (Różycka, 2016).

Por otra parte, en el año 2020 se investigó el impacto de la diatomita en el comportamiento técnico y estructural del mortero lo cual, reafirma la posibilidad de utilizarlo en el concreto celular autoclaveado (Flores, López, Velázquez, & Moreno, 2020).

La diatomita será el tercer aditivo el cual se evaluará dentro de la síntesis de AAC para conocer su impacto en la resistencia a la compresión, la conductividad térmica y la reducción de agua utilizado.

JUSTIFICACIÓN

Crear una nueva formulación aditivada de concreto celular autoclaveado, la cual no ha sido evaluada con anterioridad, relacionando aditivos orgánicos e inorgánicos para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y llegando a la implementación industrial. Lo cual permitirá transgredir las líneas del papel y el laboratorio para llegar a la materialización de un proyecto viable y reproducible a mayor escala.

Para lo cual se plantean los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento de un concreto celular curado en autoclave (AAC), bajo las normas ASTM-C1386 y EN-772-10-1999, con el uso de materiales silíceos e incorporando de aditivos como son lignosulfonatos, diatomita natural y perlita natural para disminuir el consumo de agua e incrementar las propiedades físicas y mecánicas como son resistencia a la compresión en un rango comprendido entre 10% y 15%.

Objetivos Específicos

1. Obtener de las materias primas mediante el muestreo estandarizado, para sintetizar el AAC con la finalidad de contar con el material inicial necesario para este proyecto.
2. Realizar análisis granulométrico de las materias primas mediante el equipo Hosokawa Micron Alpine 200SL para conocer la influencia del tamaño de partícula de cada una de ellas en el producto final.
3. Caracterizar química y mineralógicamente las materias primas por medio de las técnicas de Difracción de Rayos-X (DRX) y Espectroscopia de Rayos-X de energía dispersiva (MEB-EDS).
4. Elaborar formulaciones mediante la síntesis a nivel laboratorio para producir el concreto celular autoclaveado proponiendo la incorporación de aditivos que permitan obtener mejores propiedades físicas y mecánicas, así como una reducción de porcentaje de agua entre un 10% y 15%.
5. Caracterizar química y mineralógicamente el AAC, por medio de las técnicas de Difracción de Rayos-X (DRX) y Espectroscopia de Rayos-X de energía dispersiva (MEB-EDS) para hacer un estudio completo y adecuado del AAC.
6. Realizar pruebas físicas y mecánicas del AAC como son densidad seca, y resistencia a la compresión bajo las normas ASTM-C1386 y EN-772-10-1999 respectivamente con la finalidad de conocer el impacto de los aditivos en el AAC.
7. Elaborar el estudio económico comparativo mediante el análisis de costos directos de la formulación, para evaluar la viabilidad económica de la formulación aditivada que haya mostrado las mejores propiedades físicas y mecánicas del producto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas estructurales y constructivos están relacionados con los materiales que los componen y como se combinan o ensamblan, proporcionando así resistencia y durabilidad. Estos sistemas, se perfeccionan o innovan para dar lugar a edificaciones más sofisticadas y complejas en cuanto a su forma y funcionalidad (Lozada, 2018).

Para la industria de la construcción es muy importante abordar temas como la disminución del peso, calidad, sustentabilidad del material, ahorro de energía, rápida instalación y reducción de costo por sistema, y es así, como las tecnologías de producción del concreto han alcanzado un alto nivel de desarrollo de su mecanización y automatización. Pero al mismo tiempo, se han convertido en altas consumidoras de energía, agua y otros recursos materiales que tienen una determinante influencia en el medio ambiente de actuación (O'Reilly Díaz, 2010).

Por esta razón, la finalidad del perfeccionamiento de las mencionadas tecnologías es lograr eficiencia energética, y el menor consumo de agua, minerales y otros materiales no renovables.

El concreto celular autoclaveado, por su proceso limpio de manufactura a base de vapor, ha surgido como la mejor alternativa al ladrillo de arcilla con impactos ambientales casi insignificantes (Kalpana, 2019).

A lo largo del territorio nacional, existen solamente 2 empresas enfocadas a la fabricación del concreto celular autoclaveado, lo cual demuestra que el material es poco conocido en y representa un campo fértil para el desarrollo científico.

Sin embargo, desde el punto de vista comercial el desafío presentado es la introducción y difusión de un nuevo producto totalmente desconocido para un gran sector social del país, por lo que es imperativo contar con un soporte científico que demuestre que el material fabricado es seguro, competente y funcional.

Para el campo de la investigación, el reto consistirá en brindar el sustento científico mencionado mediante la adecuada caracterización del concreto celular y usando las técnicas apropiadas para medir su eficiencia.

Adicionalmente, se propone en esta investigación la síntesis del AAC con la incorporación de aditivos que pueden ser orgánicos, inorgánicos o la combinación de los mismos para potenciar sus múltiples beneficios.

Con la finalidad de evaluar las propiedades físicas y mecánicas, y al no contar con una normativa mexicana (NMX), las pruebas de esta investigación estarán basadas en las normas internacionales ASTM ((Standards), 1958).

El presente trabajo, también promoverá la disminución del consumo de agua en la formulación, permitiéndole ser considerado como una alternativa sustentable. Lo cual hasta el momento son beneficios que no se han explorado de manera conjunta en las investigaciones previas.

HIPÓTESIS

La incorporación de aditivos orgánico (lignosulfonato de sodio) e inorgánicos (diatomita y perlita) en la formulación del concreto celular autoclaveado, permitirá el incrementando la resistencia a la compresión del producto final en un porcentaje significativo (en el rango de 10%-15%) y disminuyendo la densidad, la conductividad térmica y el consumo de agua entre un 10% y 15% dentro de la formulación estándar.

3. METODOLOGÍA

3.1 Estrategia Experimental

En la presente sección, se abordará la estrategia experimental como el estudio de las relaciones causales entre las variables del procedimiento por el cual se obtendrán las condiciones específicas para producir el AAC aditivado deseado con baja densidad, alta resistencia a la compresión y ahorro en el consumo de agua en el proceso de elaboración, los cuales se describen a continuación:

- ✓ **Obtención de las materias primas** con la finalidad de poder contar con los materiales suficientes para realizar la síntesis del AAC.
- ✓ **Análisis granulométricos de las materias primas** que permitan conocer la influencia del tamaño de partícula de cada una de ellas en el producto final.
- ✓ **Caracterización de las materias primas** mediante las técnicas de DRX y MEB-EDS.
- ✓ **Síntesis del concreto celular autoclaveado** con aditivo para potenciar sus propiedades físicas y mecánicas.
- ✓ **Caracterización de AAC** mediante las técnicas de DRX y MEB-EDS, para conocer de manera cualitativa y cuantitativa las fases formadas en el AAC
- ✓ **Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas** de los productos para conocer la viabilidad estructural, térmica, acústica e ignífuga del AAC.
- ✓ **Elaboración de estudio económico comparativo** mediante una comparación de costo directo de formulación para conocer la viabilidad de implementación.

Por otra parte, en la figura 2 se muestra el diagrama de flujo del desarrollo experimental de este trabajo.



Figura 3. Diagrama de Flujo de Desarrollo Experimental

DESARROLLO EXPERIMENTAL (Procedimientos)

Las materias primas a utilizadas en esta investigación, son: arena sílica (dióxido de silicio con una pureza de 99%), yeso (sulfato de calcio di hidratado con una pureza de 60%), cemento (con un contenido de CaO de 64%), cal (óxido de calcio con una pureza de 95%) y polvo de aluminio (pureza de 99%), y se presentan en la Figura 3, por otra parte, en lo que respecta a los aditivos empleados, éstos serán: diatomita, lignosulfonato de sodio y perlita.



Figura 4. Materias primas utilizadas para la síntesis del AAC.

Así mismo, en lo que respecta a los aditivos empleados, éstos serán: diatomita, perlita y lignosulfonato de sodio.

En la presente sección, se abordará el desarrollo experimental como el paso a paso para la realización y ejecución de la síntesis del AAC y la descripción de las técnicas de análisis de caracterización.

1) Obtención de las materias primas y aditivos

Las materias primas, serán extraídas mediante un muestreador normalizado con base en la NOM-002-SCFI-2011 de acuerdo con las cantidades requeridas para la síntesis del producto mientras que los aditivos se obtendrán de una fuente externa.

2) Análisis granulométrico de las materias primas y aditivos

El análisis granulométrico de las materias primas que permitan conocer la influencia del tamaño de partícula de cada una de ellas en el producto final.

El ensayo o análisis granulométrico consiste en la medición y gradación de los granos o partículas constitutivas de una muestra con el fin de determinar sus propiedades mecánicas (Duque Escobar, 2019).

Para la fabricación del concreto celular autoclaveado, los agregados añadidos constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del hormigón, por lo que su selección es importante y debe consistir en partículas con tamaño adecuado y homogéneo, ya que pueden favorecer a una mejor cohesión y producción de hormigón de alta resistencia (Rengifo Cuenca, 2013).

En el presente trabajo de investigación, las materias primas y los aditivos se analizó bajo la norma NMX-C-077-1997, serán: arena sílica, cemento, yeso, cal, diatomita y perlita y se realizará de manera general para todas ellas mediante la retención obtenida de 20 g y utilizando el equipo Hosokawa Micron Alpine 200SL. mostrado en la Figura 9, el cual ha sido diseñado para la separación fraccionamiento y granulometría de polvos minerales, productos químicos, productos farmacéuticos, productos alimenticios y materiales de construcción y su funcionamiento se basa en la succión por chorro de aire.



Figura 5 Equipo de tamizado por chorro de aire Hosokawa Micron Alpine 200SL.

En el caso del polvo de aluminio, por su alto grado de peligrosidad, éste se analizará contra certificado y en el caso del lignosulfonato al ser líquido no aplicará en el proceso de tamizado.

Se utilizaron las mallas de 100 (abertura de $149\mu\text{m}$), 90 (abertura nominal $165\mu\text{m}$) y 45 (abertura nominal $354\mu\text{m}$), dependiendo de la materia prima como se muestra a continuación en la Tabla 4.

Las etapas a seguir, se presentan a continuación:

1. Se pesan 20 g de la muestra totalmente seca en una charola de aluminio.
2. Posteriormente, se colocan en el equipo Alpine el tamiz requerido para el tipo de separación.
3. Se programa el temporizador del equipo Alpine durante 2 min.
4. Se deposita la muestra sobre el tamiz colocado en el Alpine, con la ayuda de una espátula de acero inoxidable o cuchara esparcir la muestra por la malla y finalmente se coloca la tapa del Alpine.

5. Comenzar la corrida de la muestra en el Alpine, con la ayuda del martillo para Alpine golpetear pausadamente en la perilla que se encuentra al centro de la tapa para evitar que la muestra se adhiera.
6. En seguida, se inspecciona durante la corrida que no se presenten agregados del material, cuando esto suceda se debe parar la corrida y desmoronar los grumos formados con una espátula. Después continuar con la corrida dando el tiempo restante para completar los 2 min de prueba.
7. Al término del tiempo de ejecución, pesar el retenido de la malla en la charola de aluminio utilizando una báscula digital de precisión de 0.1g.
8. Finalmente, se aplica la fórmula basada en la ASTM C 136-01 (ASTM, 1898) para calcular el porcentaje de pasante resultante.

$$\% \text{ pasante} = \frac{g \text{ muestra} - g \text{ retenido}}{g \text{ muestra}} * 100$$

Para el análisis de cada una de las materias primas, en la Tabla 4 se muestran las Normas Referencia utilizadas para el análisis.

Tabla 4. Normas utilizadas para análisis de granulometría de las materias primas.

| Materias Primas | DIN ISO | ASTM E11 | Schlenk certificado de calidad |
|--------------------------------|----------------|-----------------|---------------------------------------|
| Arena sílica | | ✓ | |
| Yeso | ✓ | | |
| Cal | ✓ | | |
| Cemento | | ✓ | |
| Aluminio en polvo | | | ✓ |
| Diatomita | | ✓ | |
| Perlita | | ✓ | |
| Lignosulfonato de sodio | NA | NA | NA |

En la Tabla 4, se presentan las normas bajo las cuales se realizaron los análisis de granulometría de cada una de las materias primas y aditivos empleados en ésta investigación. Es importante mencionar que el aluminio al ser un polvo altamente explosivo y de importación, se encuentra libre de muestreo e inspección.

3) Caracterización de las materias primas y AAC

Mediante las técnicas de DRX y MEB-EDS y de conocer de manera cualitativa y cuantitativa las fases formadas en el AAC.

La caracterización de materiales es posible a través de diferentes técnicas de identificación, tales como la microscopía electrónica de barrido, de transmisión o de fuerza atómica. Es necesario conocer las propiedades de los materiales: estructura, composición, morfología, propiedades térmicas, etc., para posteriormente darle aplicación específica a los mismos.

En la síntesis de nuevos materiales como es el caso del concreto celular autoclaveado, las propiedades de éstos dependen no sólo de las propiedades de los materiales de partida, sino también de su morfología y las características interfaciales, por lo que es muy importante su determinación (Vargas Y. O.-V., 2013).

Caracterización por Difracción de Rayos-X

Un compuesto cristalino puede considerarse como una agrupación periódica y ordenada de átomos. Cuando es alcanzado por un haz de radiación cuya longitud de onda es de similar magnitud a la distancia interatómica, éste se difunde dando lugar a diferentes tipos de interferencias que son constructivas en las direcciones privilegiadas. Así la intensidad del rayo difractado depende de la disposición geométrica de los átomos y de la clase de átomos presentes. Esto hace que cada sustancia cristalina presente su

propio espectro de difracción y éste sea una auténtica “huella dactilar” del mismo, permitiendo su identificación en cualquier mezcla donde esté presente (Fernández, 2020).

La caracterización de las materias primas mediante esta técnica, se realizó con un difractómetro INEL Equinox 2000, con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V con una óptica simple $k_{\alpha 1}$, y utilizando una mezcla de gas a base de Argón-Etano con un voltaje de 220V, un tubo de rayos X de cobre, monocromador de germanio y una resolución de 0.095 FWHM y con un modo de trabajo de transmisión-reflexión, el cual se observa en la Figura 10, mientras que para la caracterización del AAC con sus diferentes adiciones también se utilizará el difractómetro BRUKER D2 PHASER, ubicado en el Instituto de Ciencias Agropecuarias de la UAEH que se muestra en la Figura 5.

La granulometría de las muestras fue de -200mallas, se colocarán en el porta muestras del equipo para obtener el patrón de difracción en el intervalo de 2θ de 5 a 100 grados y en un tiempo de adquisición de 30minutos como mínimo (tiempo de análisis requerido para detección a Rayos-X, puesto que se trata de arcillas (Suryanarayana C. & Grant, 1998)).

Los difractogramas, serán analizados de la siguiente manera:

A partir del espectro, se identificarán los patrones que se ajusten a los picos de mayor intensidad del difractograma. Si la muestra está constituida por varios minerales su difractograma será la suma de los picos correspondientes a las fases cristalinas que componen la muestra.

Con una regla milimétrica se mide el ángulo 2θ (eje de las abcisas) de cada reflexión, así como su intensidad absoluta (altura), colocando ambos valores en una tabla de excel preparada con 5 columnas. En la tercera columna, se colocan los valores de las intensidades relativas, obtenidas como porcentaje (al 100%) de la más intensa. En la

cuarta columna, se colocan los valores de espaciado d_{hkl} obtenidos a partir de los valores de 2θ mediante la expresión de Bragg ($2 d \sin\theta = n \lambda$, siendo $n=1$), sabiendo que para la obtención de los difractogramas se ha empleado radiación $K\alpha$ de Cu ($\lambda = 1.789 \text{ \AA}$) (Payán, 2018).

Para complementar el análisis en esta experimentación, será necesario, utilizar un software llamado MATCH 3.

El cual, es un programa diseñado para la identificación de fases partiendo de distintos archivos fuente de difracción de polvo obtenidos por los aparatos de Rayos-X. La identificación de fases (compuestos, especies y elementos con estructura cristalina), se hace por comparación con los patrones de difracción recogidos de una base relacional. Este programa requiere realizar un índice de la versión de la base instalada para poder obtener las entradas correspondientes de los patrones de difracción almacenados y compararlos con el difractograma procesado de la muestra y de esta manera poder realizar la identificación de fases.

Al procesar el archivo fuente, se mostrará el patrón experimental como un diagrama de barras cuya altura mide su intensidad y aparecerá en la "Lista de picos", la lista de valor " 2θ " y de intensidades "I" junto con su valor "FWHM" (Full width at half maximum)".

Para el programa, los parámetros "I" y "FWHM" serán los del patrón experimental.

Finalmente, se obtendrá una lista de resultados donde se asignará un valor de 1 si la coincidencia es total y disminuirá conforme las posiciones de los picos cotejados o las intensidades que se alejen más del patrón experimental de la muestra (Rodríguez, 2008).



Figura 6 Difractómetro INEL Equinox 2000 propiedad de la UAEH.



Figura 7 Difractómetro BRUKER D2 PHASER propiedad de la UAEH, ICAP.

En las Figuras 6 y 7 pueden observarse los equipos utilizados para la ejecución de los análisis de difracción de rayos X en la presente investigación.

3.2) Caracterización por MEB-EDS

Para el análisis de MEB-EDS, es necesario realizar las siguientes consideraciones:

La preparación de las muestras es relativamente fácil, sólo requieren que estas sean conductoras y estén totalmente secas.

Para el estudio morfológico de las muestras que fueron caracterizadas por la técnica MEB-EDS en este trabajo se llevó a cabo con muestras de polvo entre 0.1 g y 0.3 g depositadas sobre una cinta adhesiva doble cara de grafito, que posteriormente fueron recubiertas de con una capa delgada de oro para mejorar la conductividad y tener mejores imágenes de las mismas.

En este análisis, se utilizó un microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca Jeol modelo JSM-IT3000 5900LV con un alcance de 500,000 magnificaciones, un tamaño in situ (spot size) de 10^{-2} a 10^{-5} amp, con una aceleración de voltaje de 30 Kv, equipado con un detector de energía retro dispersiva de Rayos-X (EDS) marca Oxford, el cual puede observarse en la Figura 12.



Figura 8 Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH.

Una vez preparadas las muestras, se procederá a observarlas en el MEB a diferentes magnificaciones con el propósito de medir el tamaño de partícula y observar la morfología de las mismas; tanto de la materia prima como del concreto sintetizado, la medición del análisis se realizará directamente en el microscopio y auxiliándonos con las herramientas de medición del propio equipo, así mismo se tomarán diversos microanálisis puntuales y por zona con ayuda del EDS con la finalidad de obtener la composición química semi cuantitativa de nuestro material en cada punto analizado.

Caracterización por fluorescencia de Rayos-X

La técnica espectroscópica utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación-X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación-X. La radiación-X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. En seguida, los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación-X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra.

Por consiguiente, la FRX tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior al del porta muestras (Alicante, 2018).

4) Síntesis del concreto celular autoclaveado

Para realizar pruebas a nivel laboratorio, se seguirá la siguiente metodología:

1. Pesaje de materias primas

Inicialmente, se realizó el pesaje de materias primas (arena sílica, yeso, cemento, cal, polvo de aluminio, aditivos y agua) utilizadas en el proceso de síntesis mediante una báscula electrónica.

A continuación, en la Tabla 5 se muestra la formulación base de las materias primas y del agua, así como la variación del aditivo para la elaboración del concreto celular autoclaveado.

La información para la síntesis del AAC, se calculó tomando como referencia información bibliográfica previa, de acuerdo con (Saiyed, Makwana, Pitroda, & Vyas, 2014).

En la Tabla 5, se presenta un listado de las materias primas y los aditivos utilizados, así como el porcentaje de cada uno de ellos en la formulación del AAC para cada una de las muestras.

Tabla 5. Formulación base y variación de aditivos para la producción del AAC experimental.

| MATERIAS PRIMAS | Formulación base | Formulación LS | Formulación Diatomita | Formulación Perlita |
|--------------------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| | % | % | % | % |
| Arena sílica | 62.85 | 62.85 | 62.85 | 62.85 |
| Cemento | 11.03 | 11.03 | 11.03 | 11.03 |
| Yeso | 3.03 | 3.03 | 3.03 | 3.03 |
| Cal | 8.08 | 8.08 | 8.08 | 8.08 |
| Polvo de aluminio | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Lignosulfonato de sodio | 0 | 0.1, 0.15, 0.2 y 0.25 | | |
| Diatomita | 0 | | 0.1, 0.15, 0.2 y 0.25 | |
| Perlita | 0 | | | 0.1, 0.15, 0.2 y 0.25 |
| Agua | 14.98 | | | |
| TOTAL | 100 | 100 | 100 | 100 |

La Tabla 5, presenta de manera detallada el porcentaje de añadido de las materias primas en la formulación base (columna 2) y sus respectivos aditivos (columnas 3, 4 y 5).

2. Adición de materiales y mezclado

Posteriormente, se integró la mitad de la cantidad total de agua, lodos de arena sílica y se calentaron dentro de una cubeta de aluminio (Figura 4) y se utilizó una parrilla con agitación constante hasta alcanzar $45 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 1'15".



Figura 9. Lodos de arena sílica durante el proceso de calentamiento.

Se adicionaron el cemento y el yeso de manera conjunta y se mezcló durante 35", como se observa en la Figura 5.



Figura 10. Cemento portland y yeso antes de ser adicionados.

Se adicionó la cal y se mezcló durante 1'20".

El agua restante se adicionó a lo largo del proceso para facilitar el mezclado.

Se adicionó el aluminio y se mezcló durante 45".

La mezcla se vació en su totalidad en la cubeta previamente engrasada con 100ml de aceite desmoldante a temperatura ambiente en el fondo y la pared con ayuda de una brocha, véase Figura 6.



Figura 11. Recipientes engrasados con aceite desmoldante.

3. Colado de la mezcla

En esta fase, la mezcla preparada se dosificó en el molde previamente engrasado y a una temperatura controlada entre 40 y 42°C.

4. Expansión de material y endurecimiento.

Es importante mencionar que la reacción entre el aluminio, el hidróxido de calcio y el agua durante la etapa líquida, da como resultado una masa de mayor volumen y cuando el gas formado (hidrógeno) escapa en forma de burbujas microscópicas, deja una estructura porosa y que producen a su vez una expansión en el concreto de 3 veces su tamaño original en un tiempo aproximado de 45 minutos (Mitsuda & Sasaki, 1992).

Después, de un periodo comprendido entre 3 y 4 horas posteriores a la preparación, el material se ha solidificado ligeramente y tendrá una consistencia manejable para el siguiente paso.

Se dejó reposar por 4 horas antes de realizar una marca numérica de identificación en la superficie (Figura 7).



Figura 12. Reposo de 4 horas posteriores a la elaboración de la mezcla.

4. Proceso de autoclaveado

El proceso de curado se realizó en un equipo llamado autoclave, el cual consiste en un recipiente cilíndrico, metálico, de paredes resistentes y con cierre hermético, cuyos parámetros de trabajo serán, 12 bar de presión y 190°C de temperatura por un tiempo de 12 horas (Mitsuda & Sasaki, 1992).

Es durante el curado, que la arena sílica reacciona con el hidróxido de calcio y se forma hidrato de silicato de calcio (C-S-H), lo que explica su elevada resistencia (Van Boggelen W. , 2014), lo cual podrá ser corroborado con la caracterización del producto final.

Después del proceso en autoclaveado, se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión.

Como se muestra en la Figura 8, a las 24 horas posteriores a la preparación, se introducirán al proceso de curado en autoclave.



Figura 13. Muestras de concreto celular autoclaveado previo al proceso de curado.

Durante la síntesis del concreto celular de la presente investigación, se consideró que la formulación base o testigo obtenida fue la óptima, si el producto alcanza mínimo los 40 kg/cm² o bien 4MPa de resistencia a la compresión de acuerdo con la norma ASTM-C1386.

Para el presente trabajo, el testigo fue la referencia ante las demás propuestas con la incorporación del aditivo.

Finalmente, es importante mencionar que, al hacer referencia a la palabra “adición”, ésta se realizó con base en los sólidos totales de la formulación.

1. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los productos

La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó con base en las normas internacionales ASTM-C1386 y EN-772-10-1999, ya que al día de hoy no se tienen normas mexicanas para el concreto celular.

2. Análisis de resultados

En primer lugar, el análisis de resultados de caracterización de materias primas, se realizó como primer paso en este trabajo de investigación con la finalidad de conocerlas con mayor precisión.

Posteriormente y al término del proceso de síntesis del producto, se realizó el análisis de resultados de caracterización de producto terminado y evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas.

3. Estudio económico comparativo

En resumen, una vez establecidas las condiciones ideales para la mejora del producto, se realizó el estudio económico comparativo mediante una comparación de costo directo de formulación base contra la formulación con el aditivo seleccionado de acuerdo con los resultados obtenidos para conocer la viabilidad de implementación.

Es primordial considerar que antes y después del proceso de síntesis del AAC, se necesitan estudiar de las propiedades morfológicas y granulométricas de las materias primas y el producto, a este proceso se le llama caracterización.

En primer lugar, puede decirse que la caracterización de materiales es el proceso de estudio y comprensión de las propiedades físicas, eléctricas y químicas de los materiales. Es una parte esencial del análisis de ingeniería de materiales que ayuda a identificar el material adecuado para aplicaciones específicas.

De manera general, puede decirse que las técnicas avanzadas de caracterización de materiales se utilizan para analizar una amplia gama de propiedades, como la resistencia mecánica, la estabilidad térmica, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión. Con estas técnicas, se pueden optimizar sus diseños para mejorar el rendimiento y la fiabilidad, lo cual ayuda a tomar mejores decisiones sobre su aplicación y conocer su comportamiento de una manera específica (Innovation, 2023).

La caracterización avanzada de materiales tiene un impacto significativo en el diseño y producción de productos. El conocimiento preciso de las propiedades y comportamientos de los materiales es esencial para crear productos eficientes, duraderos y seguros.

3.2 Síntesis del concreto celular autoclaveado

El proceso de síntesis de concreto celular autoclaveado (Shweta O. Rathi, 2015), se realizó con base en el proceso estandarizado de fabricación conforme a los pasos que se presentan en la figura 13:

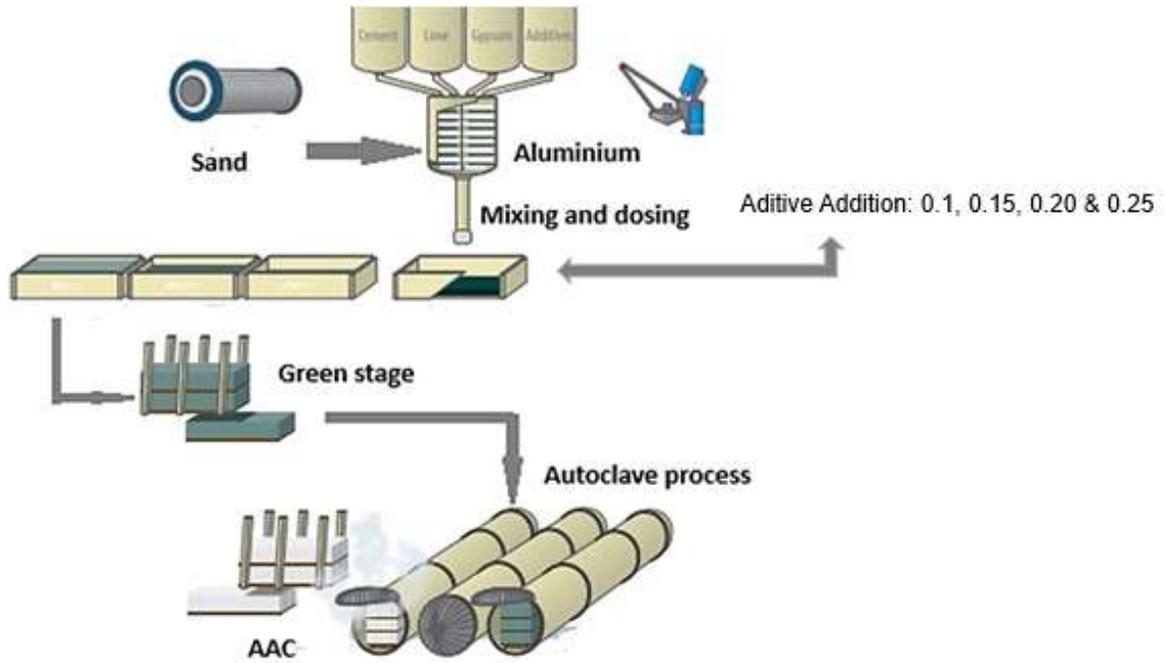


Figura 14. Diagrama de bloques que representa las etapas de fabricación del bloque de AAC.

Como puede observarse en la Figura 13, se encuentra esquematizado el proceso de síntesis del AAC desde la fase de adición de materias primas hasta el proceso de curado.

3.3 Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del AAC

Para la evaluación de la resistencia a la compresión del AAC, ésta se realizó conforme a las normas internacionales ASTM-C-1386 y EN-772-10-1999, utilizando la prensa mostrada en la Figura 14.



Figura 15. Equipo para la determinación de fuerza de compresión marca TEST-FORM, propiedad de la empresa Aircrete México.

En la figura 14, se presenta el equipo para la evaluación de la resistencia a la compresión del AAC una vez que ya ha alcanzado el porcentaje de humedad adecuado (6%) conforme a la unificación de criterios entre las normas EN y ASTM.

4 RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en el trabajo de investigación, desde la caracterización de las materias primas hasta llegar al producto terminado.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante la presente investigación.

4.1 Caracterización de Materias primas

4.1.1 Análisis granulométrico

La finalidad de este análisis es conocer el tamaño de partícula y la composición química de las materias primas y los aditivos utilizados en la síntesis del concreto celular autoclaveado.

A continuación, en la Tabla 6 se muestran las normas internacionales utilizadas y el análisis granulométrico detallado de las materias primas y aditivos.

Tabla 6. Mallas y Normas utilizadas para el análisis de tamaño de partícula de las materias primas y aditivos.

| Muestra | DIN ISO | Schlenk | ASTM E11 | |
|-------------------|-------------------|------------------------|------------------|------------------|
| | 3310-1 | certificado de calidad | No. 325 | No. 170 |
| | 100 μm | 85 μm | 45 μm | 90 μm |
| Arena sílica | | | | ✓ |
| Yeso | ✓ | | | |
| Cal | ✓ | | | |
| Cemento | | | ✓ | |
| Aluminio en polvo | | ✓ | | |
| Diatomita | | | ✓ | |
| Perlita | | | ✓ | |

Como puede verse, en la tabla 6, la primera columna indica la materia prima y/o aditivo a utilizar en la síntesis del presente trabajo mientras que en las columnas 2 a 5 se pueden observar las normas internacionales utilizadas para el análisis, número de malla y el valor resultante de tamaño de partícula.

Es importante mencionar que para el análisis realizado con el equipo Alpine, de la muestra total de 20g se procesa y se analiza el retenido en la malla seleccionada.

Por otra parte, en la Tabla 7, se muestran las composiciones químicas de las materias primas obtenidas mediante la técnica de Difracción de rayos x ya que ésta técnica si permite la identificación de compuestos químicos o fases minerales, no solamente los elementos.

Tabla 7. Tabla de composición química de las materias primas y aditivos.

| Material | SiO₂ | SO₃ | Al₂O₃ | K₂O | Na₂O | CaO | FeO | Fe₂O₃ | TiO | MgO | CaCO₃ |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|------------|------------|------------------------------------|------------|------------|-------------------------|
| Arena | 99.0 | - | 0.50 | 0.30 | - | - | - | - | - | - | - |
| Cemento | 17.9 | 4.0 | 4.5 | 0.7 | 0.3 | 63.1 | - | 3.3 | 0.20 | - | - |
| Yeso | - | 67.81 | - | - | - | 14.58 | - | - | - | 1.62 | - |
| Cal | 0.95 | - | - | - | - | 90.48 | - | - | - | 1.20 | 5.72 |
| Aluminio | - | - | 86.38 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Diatomita | 70.0 | - | 11.63 | 2.41 | 6.10 | 0.85 | 1.95 | - | 0.50 | 1.79 | - |
| Perlita | 40.19 | - | 13.76 | 2.85 | - | 0.91 | - | 1.97 | - | - | - |
| Lignosulfonato | 3.52 | - | - | - | - | 87.52 | - | - | 1.67 | - | - |

La Tabla 7, muestra de manera detallada el contenido de elementos químicos de las materias primas y los aditivos utilizados en esta investigación en términos de óxidos.

Es importante mencionar que la aparición del óxido de aluminio en la materia prima de aluminio en polvo se debe a que el aluminio metálico se oxida muy fácilmente al contacto con el aire (oxígeno y humedad), incluso a temperatura ambiente.

Esta misma situación se observa para el caso de la cal viva u óxido de calcio (CaO), debido a la carbonatación espontánea del óxido de calcio al exponerse al CO₂ del aire.

Por otra parte, en la Tabla 8, se muestra la información de las especies mineralógicas identificadas en las materias primas con sus PDF (por sus siglas en inglés, X-Ray Diffraction Pattern) correspondientes. Como se observa en la columna 2 los elementos mayoritarios de las diferentes materias primas son los siguientes: sílice para la arena sílica, portlandita y alita para el cemento, sulfato de calcio para el yeso, aluminio para el polvo de aluminio y sílice, albita, moscovita, feldespato potásico, mogonita y andesita para el aditivo diatomita. En la columna 3 se observan los PDF que permiten la adecuada identificación de las especies halladas.

Tabla 8. Especies mineralógicas identificadas en los minerales estudiados.

| Materia prima | Especies minerales | PDF |
|--------------------------|--|---|
| Arena sílica | Sílice, Albita | 96-900-8094, 96-900-0709 |
| Cemento | Portlandita, alita | 96-900-6833, 96-900-6569 |
| Yeso | sulfato de calcio | 96-901-5351 |
| Cal | óxido de calcio, sulfato de calcio | 96-200-9229, 96-901-5351 |
| Aluminio | polvo de aluminio | 96-110-1169 |
| Diatomita | Sílice, Albita, Moscovita, Feldespato Potásico, Mogonita y Andesita | 96-900-8094, 96-900-0709, 96-900-0838, 96-900-6347, 96-900-2650 y mogonita. |
| Perlita | Gotardita Aluminio, óxido de calcio, óxido de hierro, óxido de sodio, óxido de magnesio | 96-900-52-67, 96-110-1169, 96-200-9229 |
| Lignosulfonato de | Sulfonato | 96-721-8175 |

sodio

4.1.2 Composición mineralógica de materias primas por DRX.

En la figura 16, se presentan los resultados de los análisis de difracción de Rayos X de las materias primas para la fabricación del AAC obtenidos mediante el difractómetro de óptica simple $k\alpha_1$, utilizando un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

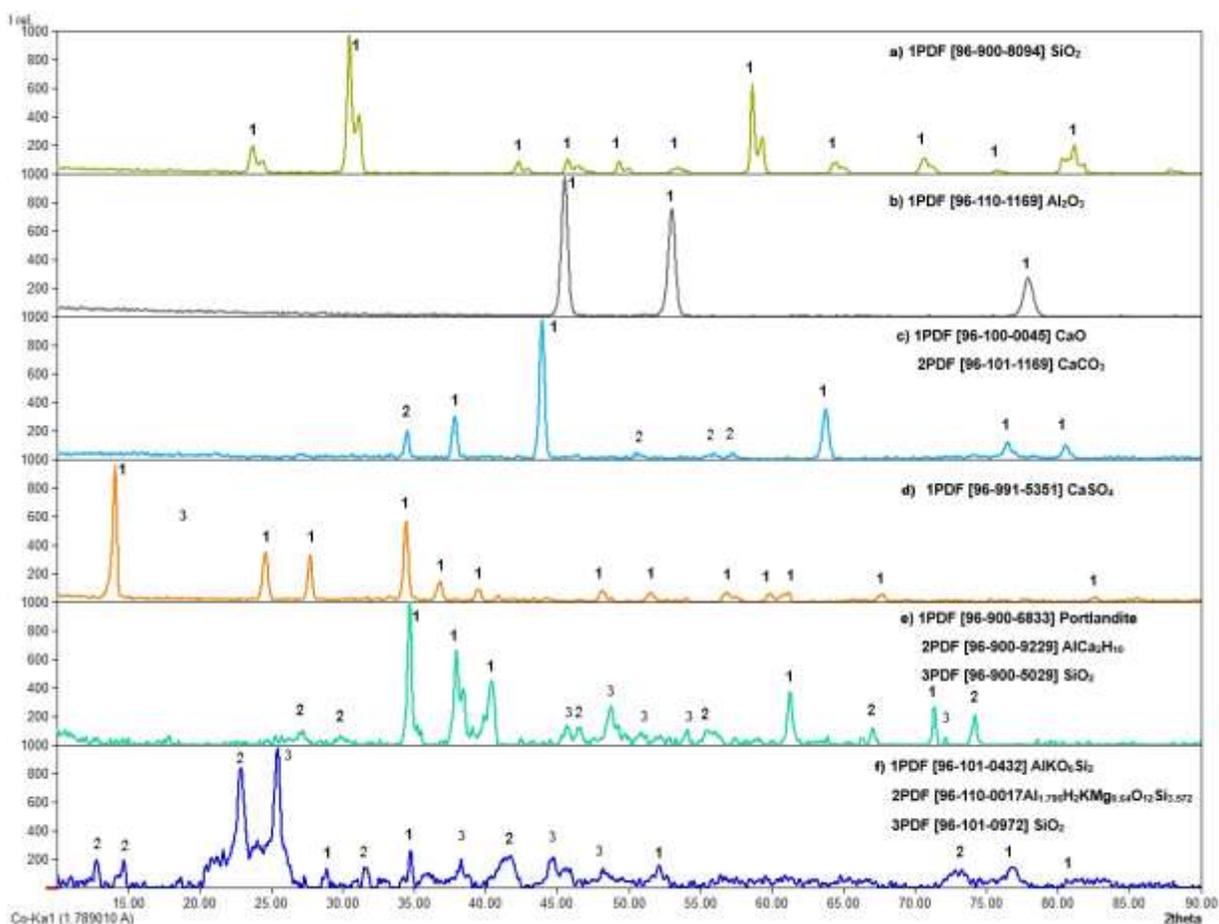


Figura 16. Difractograma de Rayos X de a) arena silica, b) aluminio, c) cal, d) yeso y e) cemento.

En la figura 16, se muestra:

Inciso (a) el espectro de la muestra de arena sílica, donde se identificaron 8 picos, y se indexaron. Se enumeraron los PDF para conocer el contenido en cada pico. El cuarzo cuyo PDF es [96-900-8094] con $d = 3.5$ SC hexagonal con un parámetro de celda $a = 5.01$ nÅ, se calcularon los índices de Miller para conocer su estructura cristalina como sigue: Si [0 1 1] Hexagonal, como se puede observar, en el ángulo 2θ 30.75° donde se encuentra el SiO_2 .

Inciso (b) el espectro de la muestra de polvo de aluminio, donde se identificaron 3 picos, y se indexaron. Se enumeraron los PDF para conocer el contenido en cada pico. El polvo de aluminio cuyo PDF es [96-110-1169].

Inciso (c), el espectro de la muestra de cal (CaO) que contiene primordialmente CaO con adición de CaSO_4 . Se identificaron 10 picos, y se indexaron, cuyo PDF es [96900-8411] con $d = 1.67$ SC ortorrómbica con parámetro de celda $a = 6.557$ Å.

Inciso (d), el espectro de muestra de yeso, donde se observa el difractograma del precursor yeso (CaSO_4), que contiene primordialmente yeso. Se identificaron 9 picos, y se indexaron, el CaSO_4 cuyo PDF es [96-900-5351] con $d = 3.19$ Å, con estructura cristalina monoclinica con parámetro de celda = 10.47 Å.

Finalmente, en el inciso (e), el espectro de la muestra de cemento, donde se observa el difractograma del precursor, que contiene primordialmente portlandita, donde se identificaron 5 picos. La portlandita, cuyo PDF es [96-900-6333] con $d = 3.14$ Å y 2θ de 34.75 y sistema hexagonal; así mismo se indexó $\text{AlCa}_2\text{H}_{10}\text{O}_8$ con PDF [96-200-9229] con $d = 2.18$ Å con parámetro de celda $a = 3.94$ Å, y SiO_2 PDF es [96-900-5024] con $d = 3.14$ Å y 2θ de 34.75 y sistema hexagonal.

Podemos destacar que los resultados observados en los difractogramas de las materias primas, tienen las composiciones adecuadas para la elaboración del AAC, de acuerdo con bibliografía consultada (Hauser & Eggenberger, 1999).

4.1.3 Caracterización por MEB-EDS materias primas

En las figuras de la 17 a la 21, se presentan los resultados de la morfología de las materias primas, obtenidas por análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 (Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

La presencia del elemento oro en cada una de las muestras, se debe al recubrimiento de la muestra para efectuar el análisis.

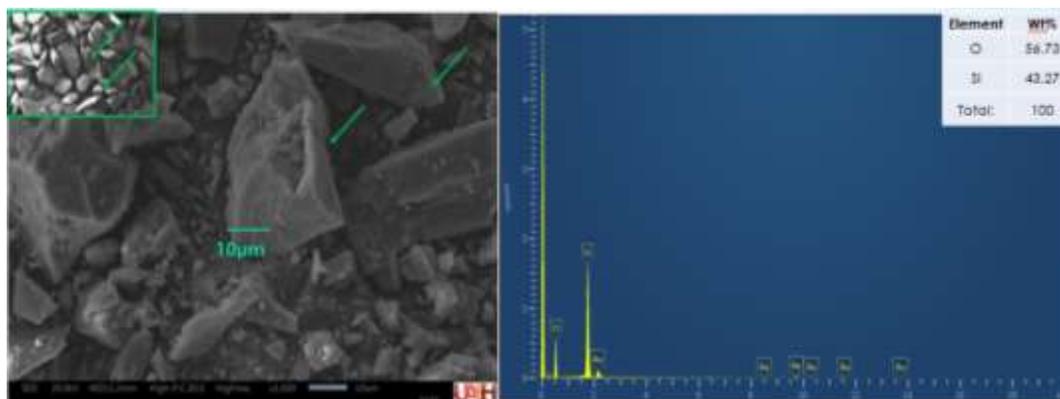


Figura 17. Imagen de arena sílica. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS.

En la Figura 17, se muestra que el mineral presenta una morfología irregular y angular, de forma subhedral con formaciones de hábito laminar o tabular y con partículas de tamaño variable en el rango de 2 a 40 μm . La combinación de la información morfológica y composicional obtenida permite inferir que el mineral analizado corresponde a la microestructura característica de la arena sílica, lo cual concuerda con la revisión bibliográfica (Suresh, Harsha, & Ghosh, 2009) [recuadro superior izquierdo].

Por otra parte, el análisis EDS confirma la composición química del mineral, destacándose los elementos Si y O, característicos de silicatos, junto con cantidades menores de Ca, Si, Al entre otras. La distribución homogénea de los elementos sugiere una estructura cristalina relativamente uniforme, aunque con zonas de heterogeneidad química posiblemente debidas a inclusiones o impurezas.

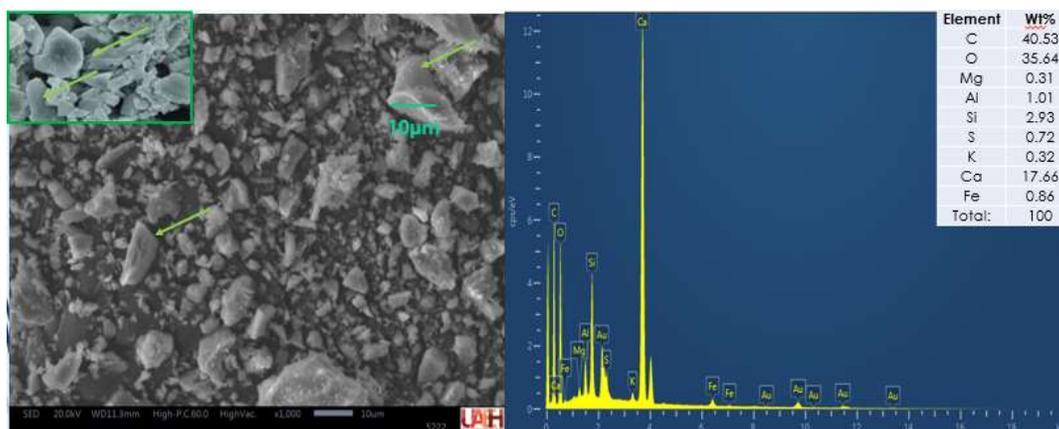


Figura 18. Imagen de cemento portland. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS.

En la Figura 18, se muestra una morfología irregular, de forma anhedral con formaciones de tipo druzo, con partículas de tamaño variable en el rango de 2 a 15 µm. La combinación de la información morfológica y composicional obtenida permite inferir que el material analizado corresponde a la microestructura característica del cemento portland, lo cual concuerda con la revisión bibliográfica (Byung-Wan, Sumit, Ki Heon, & Yung-sung, 2014), [recuadro superior izquierdo].

Por otra parte, el análisis EDS confirma la composición química, destacándose los elementos C, O y Ca, junto con cantidades menores de elementos como Si, S y Al entre otras. La distribución homogénea de los elementos sugiere una estructura cristalina relativamente uniforme, aunque con zonas de heterogeneidad química posiblemente debidas a inclusiones o impurezas.

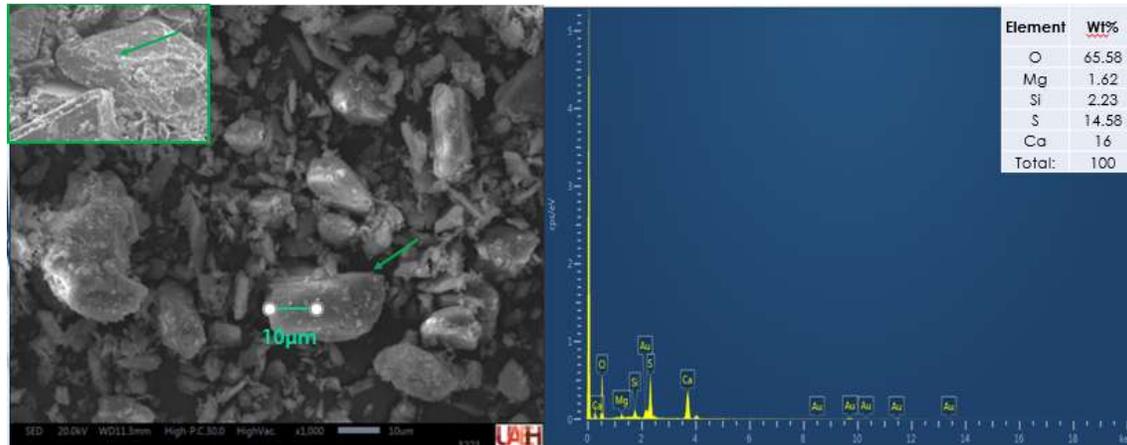


Figura 19. Imagen de yeso. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS.

En la figura 19, se muestra una morfología irregular, de forma subhedral de hábito prismático en los cristales de mayor tamaño. Por otra parte, los pequeños cristales formados son del tipo micáceo donde en general el tamaño puede variar de entre 1 a 20micras. La combinación de la información morfológica y composicional obtenida permite inferir que el material analizado corresponde a la microestructura característica del yeso, lo cual concuerda con la revisión bibliográfica (Jun, Kyungsun, & Sangwon, 2015), [recuadro superior izquierdo].

Por otra parte, el análisis EDS confirma la composición química, destacándose los elementos O, S y Ca, junto con cantidades menores de elementos como Mg entre otros. La distribución homogénea de los elementos sugiere una estructura cristalina relativamente uniforme, aunque con zonas de heterogeneidad química posiblemente debidas a inclusiones o impurezas.

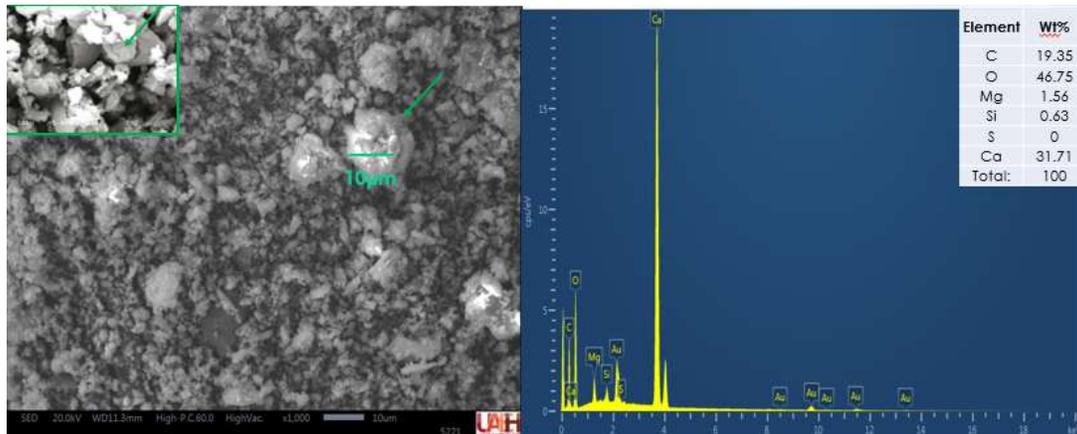


Figura 20. Imagen de cal. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS.

En la figura 20, se muestra una morfología irregular y aglomerada, de forma anhedral, con un tamaño entre 1 a 10micras. La combinación de la información morfológica y composicional obtenida permite inferir que el material analizado corresponde a la microestructura característica de la cal, lo cual concuerda con la revisión bibliográfica (Galván, 2011), [recuadro superior izquierdo].

Por otra parte, el análisis EDS confirma la composición química, destacándose los elementos Mg, Si y S. La distribución homogénea de los elementos sugiere una estructura cristalina relativamente uniforme, aunque con zonas de heterogeneidad química posiblemente debidas a inclusiones o impurezas.

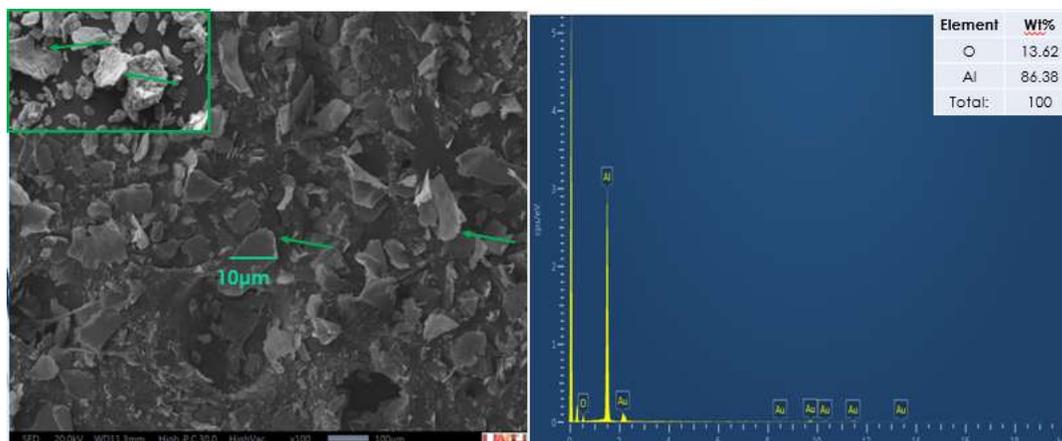


Figura 21. Imagen de polvo de aluminio. Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 1000, b) espectro del análisis EDS.

En la figura 21, se muestra una morfología irregular de hábito y con bordes redondeados similares al hábito exfoliable por separarse fácilmente en placas u hojas y con un tamaño variable entre 10 a 100micras. La combinación de la información morfológica y composicional obtenida permite inferir que el material analizado corresponde a la microestructura característica del polvo de aluminio, lo cual concuerda con la revisión bibliográfica (Casati, 2014), [recuadro superior izquierdo].

Por otra parte, el análisis EDS confirma la composición química, destacándose los elementos principales Al y O. La distribución homogénea de los elementos sugiere una estructura cristalina relativamente uniforme.

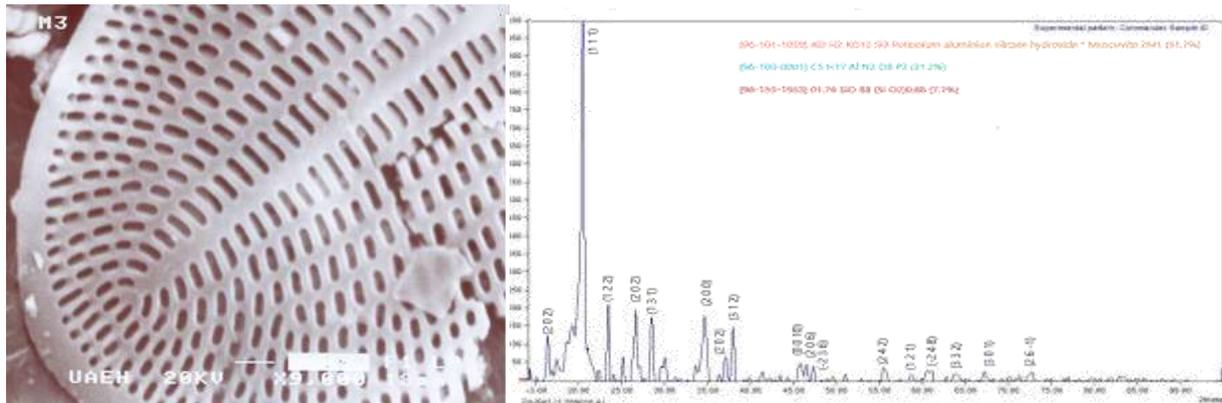


Figura 22 Imagen de diatomita natural a) Fotomicrografía obtenida por MEB (SE) x 9000, b) espectro del análisis EDS.

En la figura 22, se muestra una morfología de superficie rugosa y porosa, con un tamaño promedio de 100micras. La combinación de la información morfológica y composicional obtenida permite inferir que el material analizado corresponde a la microestructura característica de la diatomita, lo cual concuerda con la revisión bibliográfica (Serralde-Lealba, 2021), [recuadro superior izquierdo].

Por otra parte, el análisis EDS confirma la composición química, destacándose los elementos principales Si y Al. La distribución homogénea de los elementos sugiere una estructura cristalina relativamente uniforme.

4.2 AAC ADITIVADO CON DIATOMITA

Para abordar el tema del concreto celular autoclaveado aditivado con diatomita, se estudió el efecto la variación de la relación de óxido de calcio/óxido de silicio (CaO/SiO_2) con la finalidad de favorecer un incremento en la formación de la tobermorita 11Å y mejorar la propiedad mecánica de resistencia a la compresión.

Para el diseño preliminar de la síntesis del AAC aditivado, se evaluó la fórmula estequiométrica de la tobermorita y los elementos que pueden participar en la formación de esta fase.

En la figura 23 podemos observar que para que se logre una formación adecuada de tobermorita 11Å, es importante lograr el equilibrio adecuada entre la temperatura de curado y la relación de óxidos.

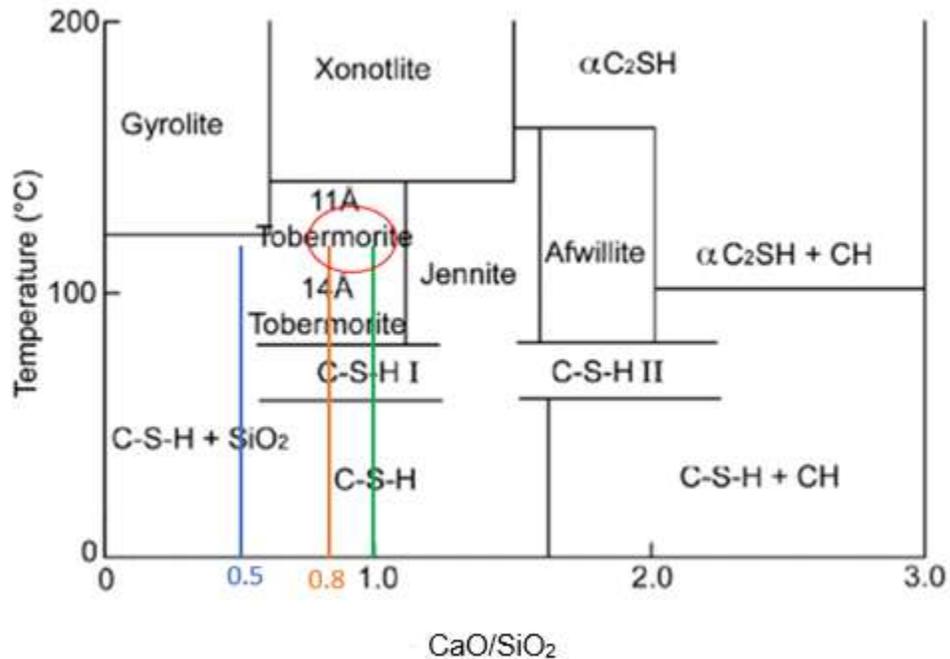


Figura 23. Diagrama de fases de la formación de tobermorita (Atkinson & Harris, 1995)

Para la selección de las relaciones CaO/SiO_2 a utilizar, se analizó la contribución de una cantidad adecuada de Si y Ca de acuerdo con el diagrama de fases de la figura 23. En el caso particular de la figura 23, éste diagrama fue elaborado a una presión de 12 bar. Estas condiciones se encuentran descritas en el proceso de síntesis de concreto celular autoclaveado y para alcanzar

Para la primera fase de la investigación, se mantuvo una relación de óxidos de 0.5, mientras que, para la segunda fase se consideró una relación de óxidos de 0.8 y finalmente se consideró una relación de óxidos de 1.0 con la finalidad de favorecer el incremento de formación de la tobermorita 11Å en comparación con la tobermorita 14Å e incrementar el valor de esfuerzo a la compresión.

4.2.1 Composición mineralógica de diatomita por DRX.

En la figura 23, se presenta el resultado de los análisis de difracción de Rayos X del aditivo diatomita, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, con un

difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V. En donde se identificaron los picos correspondientes, y se indexaron, los PDF de las fases identificadas que son [96-101-0432] correspondiente a AlK_6SiO_2 en los ángulos 30.9° , 35.8° , 64.9° y 72.4° , [96-900-110-0017] correspondiente a $\text{Al}_{1.78}\text{K}_2\text{KMg}_{64}\text{O}_{12}\text{Si}_3$ en los ángulos 22.99° , 31.03° , 44.8° y 72.75° y finalmente [96-101-0972] correspondiente a SiO_2 Cristobalita en los ángulos 25.62° , 41.85° , 52.35° , 62.71° y 76.92° , lo cual corrobora la presencia de tres fases.

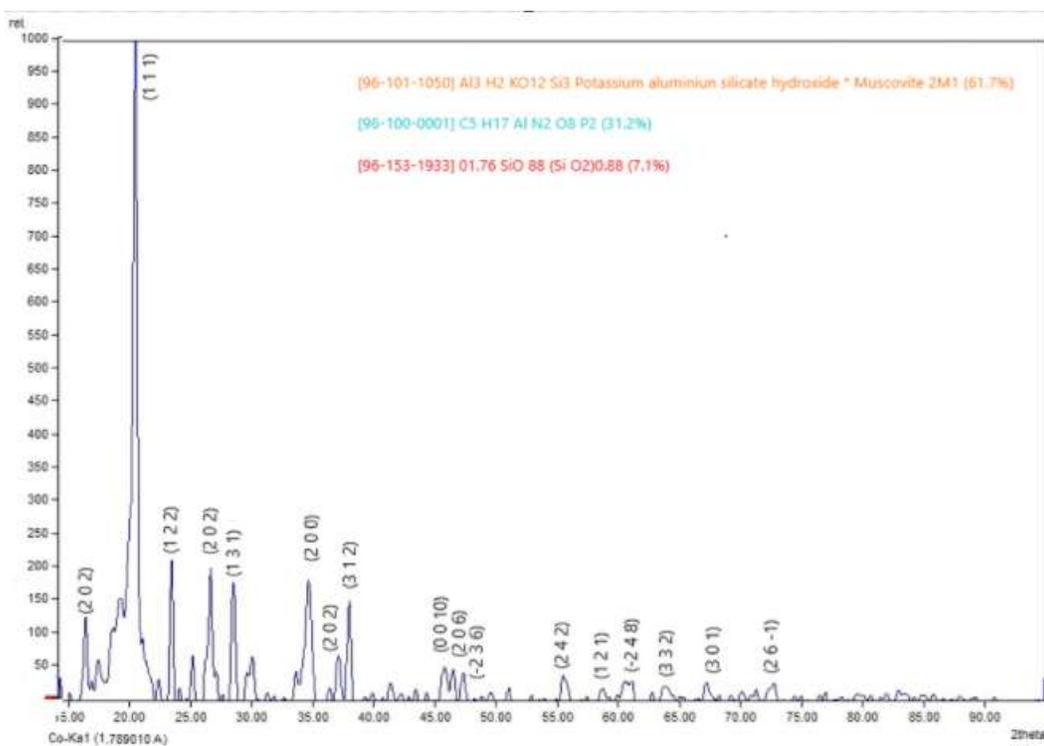


Figura 24. Difractograma de Rayos X de diatomita.

4.2.1.1 Composición mineralógica de AAC con diatomita por DRX, fase 1

A continuación, en la figura 24 se presentan los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC manteniendo una relación de óxidos $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$,

obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $K_{\alpha 1}$, con un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

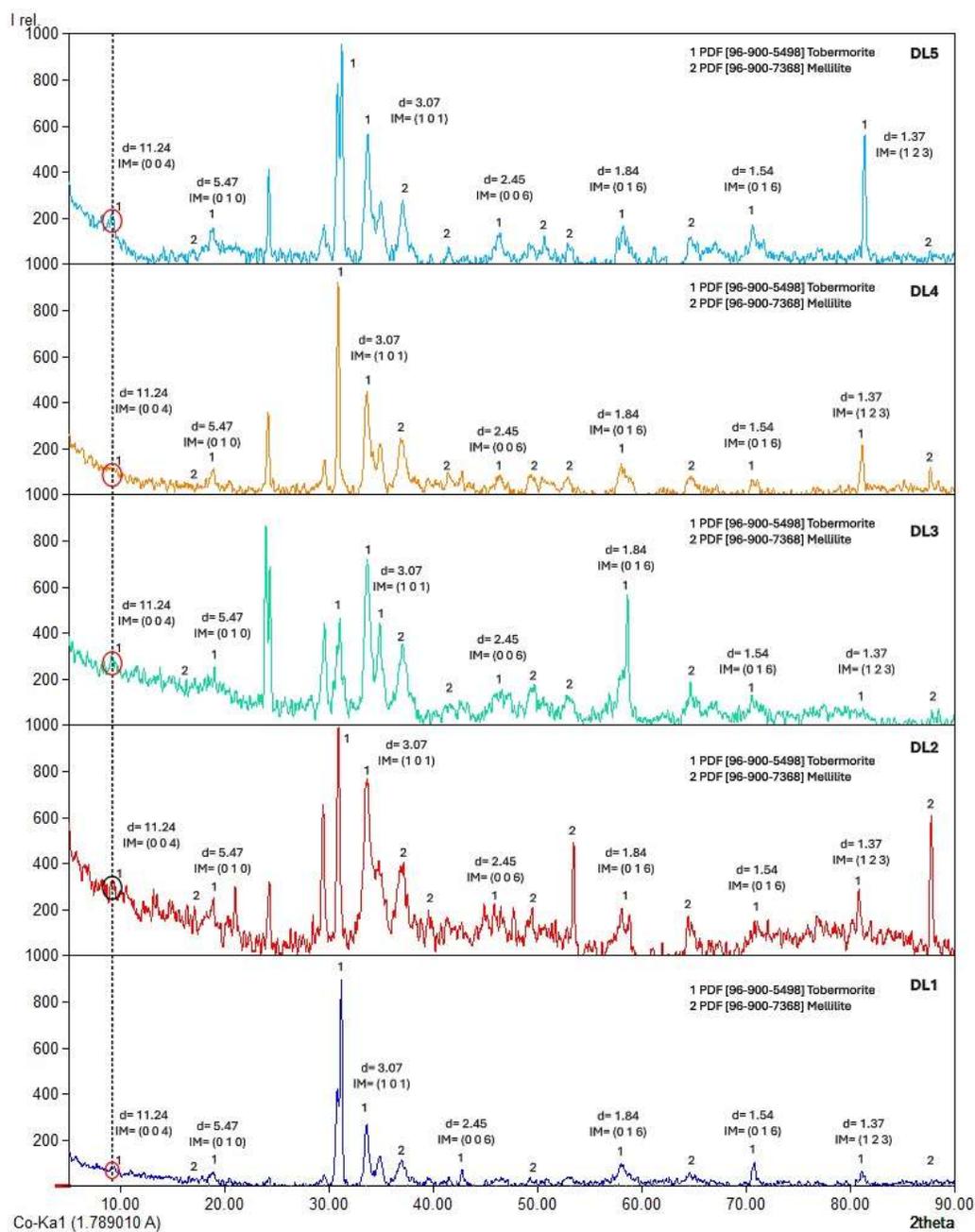


Figura 25. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ a diferentes concentraciones de diatomita, muestra 1 con 0%, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25.

En la figura 25, de manera ascendente se puede observar que:

DL1.- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de diatomita añadida, tiene 80.38% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 12Å y una resistencia a la compresión de 3.5MPa, valor inferior a los 4MPa mínimo esperado.

DL2.- Este espectro, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de diatomita natural añadida, tiene 79.26% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 9Å y una resistencia a la compresión de 4.65MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL3.- Este espectro, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de diatomita natural añadida, tiene 81.33% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 9Å y una resistencia a la compresión de 4.66MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL4.- Este espectro, corresponde a la síntesis del AAC con 0.2% de diatomita natural añadida, tiene 50.61% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 9Å y una resistencia a la compresión de 4.15MPa, valor ligeramente superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL5.- Este espectro, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25 % de diatomita natural añadida, tiene 74.47% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 9Å y una resistencia a la compresión de 3.78MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

En la figura 25 en la parte de la extrema derecha, se identificó un ligero desplazamiento a la izquierda del pico correspondiente a la tobermorita, ubicado en 2θ de 30°. También se observa el plano característico (004) de la tobermorita de 11Å. Esto indica un aumento gradual del tamaño del cristal con respecto a la relación CaO/SiO₂ de 0,5, debido al aumento de la relación calcio (diatomita). Además, se observa un aumento progresivo de la cristalinidad, calculado mediante la Ley de Scherrer como modelo matemático para determinar la adición óptima para optimizar las propiedades mecánicas del AAC.

4.2.1.2 Composición mineralógica de AAC con diatomita por DRX, fase 2

Al igual que en el análisis anterior, la información obtenida por ésta técnica, permitió determinar la estructura cristalina mediante el método analítico para una estructura ortorrómbica (Suryanarayana, 1998).

A continuación, en la figura 26 se presentan los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC manteniendo una relación de óxidos $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, con un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

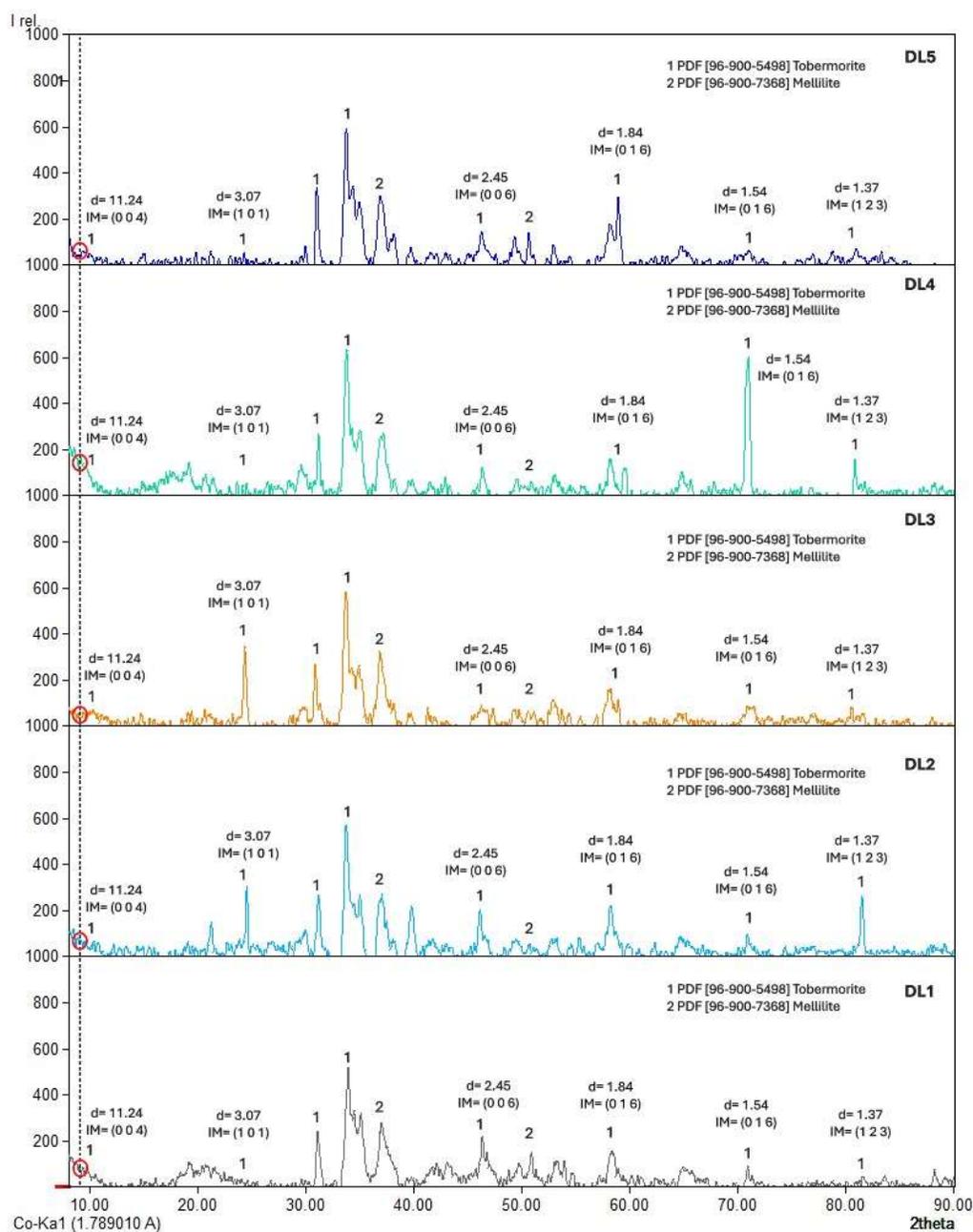


Figura 26. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ a diferentes concentraciones de diatomita, numero 1 sin diatomita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25.

En la figura 26, se observa que:

DL1 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de diatomita añadida, tiene 81.52% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 12Å y una resistencia a la compresión de 3.68MPa, valor inferior a los 4MPa mínimo esperado.

DL2 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de diatomita añadida, tiene 69.77% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 11Å y una resistencia a la compresión de 3.74MPa, valor inferior a los 4MPa mínimo esperado.

DL3 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de diatomita añadida, tiene 62.57% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 11Å y una resistencia a la compresión de 4.7MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL4 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.20% de diatomita añadida, tiene 71.33% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 11Å y una resistencia a la compresión de 4.73MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL5 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25% de diatomita añadida, tiene 65.00% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 12Å y una resistencia a la compresión de 4.52MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

Como se explicó en el caso anterior, también se determinó la formación de tobermorita en el ángulo 2θ (32° y 35°). De esta manera, se calculó, para el caso del difractograma DL1, la formación de solo el 17,10 % de tobermorita de 11 Å. Por otro lado, a medida que aumentaba la cantidad de diatomita añadida, la cantidad de tobermorita de 11 Å formada también aumentaba, como se muestra a continuación: con un 0,1 % de diatomita se alcanzó un 21,1 % de tobermorita de 11 Å; con un 0,15 % se obtuvo un 24,2 % de tobermorita de 11 Å; con un 0,2 % la cantidad obtenida fue del 38 %. Sin embargo, al añadir un 0,25 % de diatomita, la formación de tobermorita de 11 Å disminuyó al 28,9 %, apareciendo también un 5 % de tobermorita de 9 Å y un 17,1 % de tobermorita de 14 Å.

Debido a la composición química de la diatomita (alto contenido de sílice), su adición al AAC aumentó la formación de tobermorita de 11 Å en comparación con la de 9 Å y 14 Å, modificando de forma similar la distribución.

4.2.1.3 Composición mineralógica de AAC con diatomita por DRX, fase 3

Al igual que en los análisis anteriores, la información obtenida por ésta técnica, permitió determinar la estructura cristalina mediante el método analítico para una estructura ortorrómbica (Suryanarayana, 1998).

A continuación, en la figura 27 se presentan los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC manteniendo una relación de óxidos $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, con un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

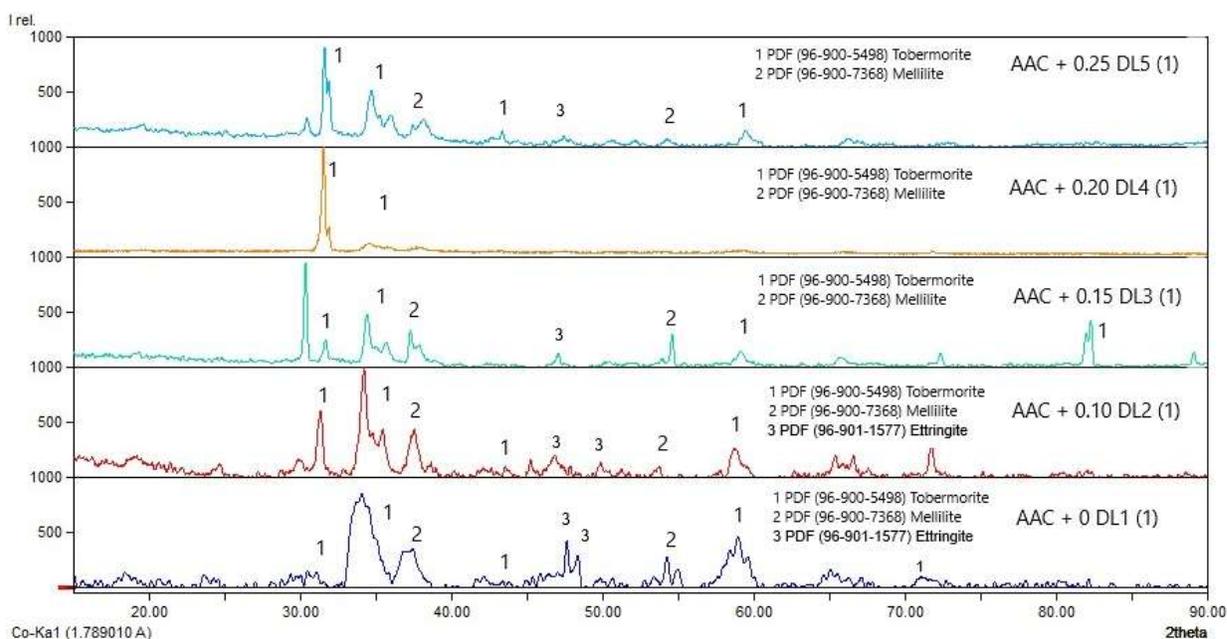


Figura 27. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ a diferentes concentraciones de diatomita, numero 1 sin diatomita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%.

En la figura 27, se observa que:

DL1 (1).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de diatomita añadida, tiene 81.52% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 12\AA y una resistencia a la compresión de 3.68MPa, valor inferior a los 4MPa mínimo esperado.

DL2 (1).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de diatomita añadida, tiene 69.77% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 11\AA y una resistencia a la compresión de 3.74MPa, valor inferior a los 4MPa mínimo esperado.

DL3 (1).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de diatomita añadida, tiene 62.57% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 11\AA y una resistencia a la compresión de 4.7MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL4 (1).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.20% de diatomita añadida, tiene 71.33% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 11Å y una resistencia a la compresión de 4.73MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

DL5 (1).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25% de diatomita añadida, tiene 65.00% de cristalinidad con un tamaño de cristal de 12Å y una resistencia a la compresión de 4.52MPa, valor superior a los 4MPa mínimo esperado.

Comparando las figuras 24 y 25, podemos observar que los resultados de $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ y $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ tienen un comportamiento semejante en lo que respecta a cristalinidad y tamaño de cristal.

Con la información obtenida por esta técnica, fue posible realizar el cálculo del porcentaje de formación de tobermorita 9Å, 11 Å y 14 Å en cada una de las muestras, la cual se presenta en la tabla 9, donde se observan los resultados del tipo de tobermorita precipitada durante la síntesis de AAC, utilizando tres diferentes relaciones de óxido y añadiendo diferentes contenidos de diatomita. La Tabla está dividida en 3 secciones $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ y $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$.

Tabla 9. Resultados de la tobermorita sintetizada durante la síntesis de AAC, utilizando diferentes proporciones de óxido (0,5 y 0,8) y añadiendo diferentes contenidos de diatomita (0, 0.10%, 0.15%, 0.20% y 0,25 %).

| Oxide Ratio | Sample ID | Diatomita added (%) | Tobermorita 9 Å (%) | Tobermorita 11 Å (%) | Tobermorita 14 Å (%) |
|----------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| CaO/SiO₂ = 0.5 | DL1_0.5 | 0.00 | 22.00 | 0.00 | 0.00 |
| | DL2_0.5 | 0.10 | 29.00 | 0.00 | 0.00 |
| | DL3_0.5 | 0.15 | 31.17 | 0.00 | 0.00 |
| | DL4_0.5 | 0.20 | 33.00 | 0.00 | 13.51 |
| | DL5_0.5 | 0.25 | 14.10 | 19.80 | 13.20 |
| CaO/SiO₂ = 0.8 | DL1_0.8 | 0.00 | 0.00 | 17.10 | 0.00 |
| | DL2_0.8 | 0.10 | 0.00 | 21.10 | 0.00 |
| | DL3_0.8 | 0.15 | 0.00 | 24.20 | 0.00 |
| | DL4_0.8 | 0.20 | 0.00 | 38.00 | 0.00 |
| | DL5_0.8 | 0.25 | 5.00 | 28.90 | 17.70 |
| CaO/SiO₂ = 1.0 | DL1_1.0 | 0.00 | 0.00 | 20.10 | 0.00 |
| | DL2_1.0 | 0.10 | 0.00 | 18.00 | 0.00 |
| | DL3_1.0 | 0.15 | 0.00 | 22.20 | 0.00 |
| | DL4_1.0 | 0.20 | 4.82 | 21.00 | 0.00 |
| | DL5_1.0 | 0.25 | 0.00 | 36.5 | 19.00 |

La Tabla 9, muestra 2 secciones principales $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ y $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ ubicadas en la columna número 1.

La segunda columna muestra los ID para la identificación de cada una de las muestras y posteriormente de las columnas 3 a 6 se puede observar el porcentaje de formación de cada uno de los tipos de tobermorita por muestra.

Como se puede observar en la primera fase, se obtuvo solamente la formación de tobermorita con un tamaño de cristal de 9Å, con un comportamiento Gaussiano donde se alcanzó el valor máximo de tobermorita con la adición de 0.20% de diatomita natural, alcanzando el valor más bajo con la adición de 0.25% diatomita.

De acuerdo con este análisis, podemos observar que en la primera fase de la experimentación, no hay presencia de la tobermorita con el tamaño de cristal deseado de

11Å, solamente en la última muestra con un porcentaje de adición de 0.25, pero al mismo tiempo es también la muestra donde se presentan los otros tamaños de cristal 9Å y 14Å. Por otra parte, en la segunda parte de la experimentación con una mayor relación de óxidos en cada una de las muestras preparadas se hace evidente la presencia de la tobermorita 11Å, y el mayor porcentaje de ésta se alcanza con la adición de 0.20% de diatomita natural puesto que al incrementar a 0.25% comienzan a aparecer los otros dos tamaños de cristal 9Å y 14Å.

Finalmente, en lo que respecta a la tercera parte de la experimentación con la mayor relación de óxidos, se pudo observar un comportamiento muy similar a la segunda fase, donde hay una mayor formación de tobermorita 11 Å.

Teóricamente y de acuerdo con el diagrama de fases, al incrementar la relación de óxidos CaO/SiO₂, habría una diferencia muy evidente con respecto a las 2 primeras fases, sin embargo, los valores resultantes son muy similares, lo cual indica que con el sólo hecho de mantener una relación de óxidos de 0.8, sería suficiente para mejorar la cantidad de tobermorita 11Å en el AAC.

Es importante considerar que el aumento de la relación de óxidos, implica ajustar las cantidades de materias primas en la formulación, lo cual, se ve reflejado en un ligero incremento en el costo del producto final.

A continuación, se presenta la Tabla 10 donde se presentan los parámetros de cristalinidad.

Tabla 10. Resultados comparativos de porcentaje de formación de tobermorita, valores de resistencia a la compresión y parámetros de cristalinidad.

| Fase de experimentación | Clave Identificación | % diatomita añadido | Resist. Compr. (MPa) | Cristalinidad (% tobermorita) | Tamaño de cristal |
|-------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|
| Diatomita_0.5 | D1_0.5 | 0 | 3.5 | 80.38 | 12 |
| | D2_0.5 | 0.1 | 4.65 | 79.26 | 9.3 |
| | D3_0.5 | 0.15 | 4.66 | 81.33 | 9.3 |
| | D4_0.5 | 0.2 | 4.15 | 50.61 | 9.3 |
| | D5_0.5 | 0.25 | 3.78 | 74.47 | 9.3 |
| Diatomita_0.8 | D1_0.8 | 0 | 3.68 | 81.52 | 12 |
| | D2_0.8 | 0.1 | 3.74 | 69.77 | 11.3 |
| | D3_0.8 | 0.15 | 4.7 | 62.57 | 11.3 |
| | D4_0.8 | 0.2 | 4.73 | 71.33 | 11.3 |
| | D5_0.8 | 0.25 | 4.52 | 65 | 12 |
| Diatomita_1.0 | D1_1.0 | 0 | 3.81 | 75.10 | 9.3 |
| | D2_1.0 | 0.1 | 4.2 | 51.2 | 11.3 |
| | D3_1.0 | 0.15 | 4.5 | 80.42 | 11.3 |
| | D4_1.0 | 0.2 | 4.4 | 66.18 | 11.3 |
| | D5_1.0 | 0.25 | 4.1 | 51.2 | 11.3 |

Por otra parte, como se muestra en la Tabla 10, en la primera columna la relación de óxidos de 0.5, 0.8 y 1.0. En la segunda columna se observa la clave de identificación, mientras que la tercera columna muestra el porcentaje de adición de diatomita aplicada en cada caso, las columnas 4 a 6 muestran los resultados de resistencia a la compresión, porcentaje de cristalinidad y tamaño de cristal respectivamente para cada una de las muestras.

Por lo tanto, puede observar que, en la primera fase de la experimentación (0.5%), la adición de un 0.15% de diatomita natural en la síntesis del hormigón celular tratado en autoclave aumenta el valor de la resistencia a la compresión ligado al porcentaje de formación de tobermorita 11Å.

Así mismo, se puede observar que en la segunda fase de la experimentación (0.8%), la adición de un 0.20% de diatomita natural en la síntesis del hormigón celular tratado en autoclave aumenta el valor de la resistencia a la compresión ligado al porcentaje de formación de tobermorita 11Å.

En la tercera fase, los valores obtenidos muestran que el valor más alto de resistencia a la compresión con un valor de 4.5MPa y tiene un tamaño de cristal de 11Å cuando se tiene una adición de 0.15% de diatomita.

La quinta columna de la gráfica presenta la cristalinidad en cada una de las fases de la experimentación. Como puede verse, no necesariamente un valor alto de cristalinidad corresponde al valor más alto de resistencia a la compresión.

Como puede observarse, en la sexta columna, la cristalinidad graficada contra el tamaño de cristal, nos muestra un incremento de formación de tobermorita 11Å en la experimentación donde $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ y en $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ como puede verse en las gráficas.

Es importante mencionar que un alto valor de cristalinidad, no necesariamente está directamente relacionado con una alta resistencia a la compresión. Esta es la razón por la cual es necesario tener en cuenta que la cristalinidad obedece al tipo de cristal de tobermorita y la resistencia a la compresión puede estar relacionada con las microfrazas que se pueden generar en el límite de grano del material.

Las columnas 5 y 6 muestran el tamaño de cristal obtenido en las diferentes relaciones de CaO/SiO_2 , y se puede observar que no hay una variación importante entre los valores cuando la relación de óxidos es 0.8 y 1.0 ni en cristalinidad ni en tamaño de cristal.

4.2.2 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 1

En la figura 28, se presenta los resultados de la morfología del AAC aditivado con diatomita obtenidas por análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

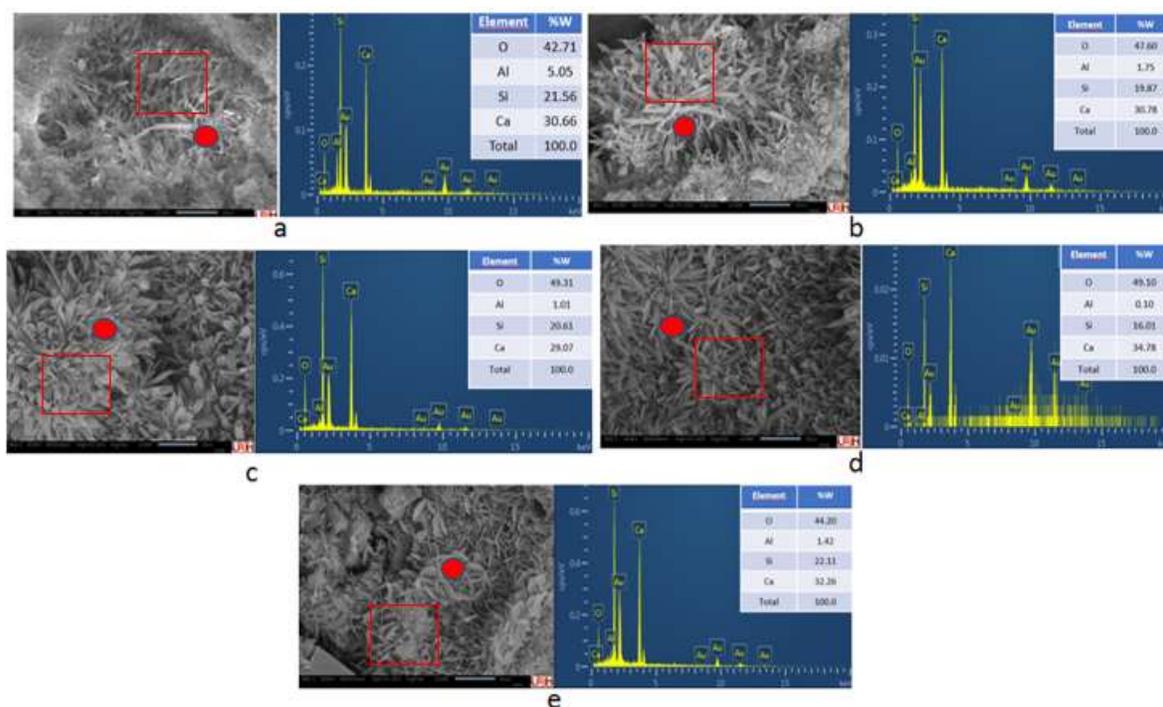


Figura 28. Fotomicrografías de tobermorita obtenida por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ en todos los casos y a) y 0% de diatomita, b) 0.10% de diatomita, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20%, y e) 0.25% de diatomita.

En esta figura se muestra la morfología típica de la tobermorita y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constantes la composición de $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ y variando el porcentaje de diatomita natural como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %. Así mismo, en todos los casos se muestra la morfología típica de los cristales de tobermorita.

Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

A continuación, se muestra la descripción detallada de la caracterización por MEB-EDS correspondientes a la $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ de cada una de las adiciones de diatomita.

- a) En la Figura 28a, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de diatomita, se puede observar la presencia de la fase melilita, la cual se forma como estructuras tetragonales bien definidas como agujas y precursoras de la tobermorita (que se encuentra en menor cantidad).
- b) En la figura 28b, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.10% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática bien definida de caras planas y bordes nítidos.

El hábito cristalino de la tobermorita puede variar, pero tiende a formar agregados columnares. Los agregados se presentan en forma de cristales individuales dispersos en la matriz.

- c) En la figura 28c, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.15% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática bien definida de caras planas y bordes nítidos.

El hábito cristalino de la tobermorita puede variar, pero tiende a formar agregados columnares pero con mayor definición.

- d) En la figura 28d, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.20% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales

prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática bien definida de caras planas y bordes nítidos.

El hábito cristalino de la tobermorita puede variar, pero tiende a formar agregados columnares pero con mayor definición y saturación.

- e) En la figura 28e, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.25% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática bien definida de caras planas y bordes nítidos.

El hábito cristalino de la tobermorita puede variar, pero tiende a formar agregados columnares más dispersos.

4.2.3 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 2

Para el caso, cuando la relación de óxido fue de 0.8 y evaluándose la adición de 0, 0.1, 0.15, 0.2 y 0.25 % de diatomita, las imágenes correspondientes de las partículas de tobermorita observadas se muestran en la Figura 29.

En la figura 29 se presentan los resultados del análisis por MEB-EDS de las muestras de AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, observándose la morfología típica de la tobermorita y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constante la relación de óxidos y variando el porcentaje de diatomita natural como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %. Así mismo, en todos los casos se muestra la morfología típica de los cristales de tobermorita. Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

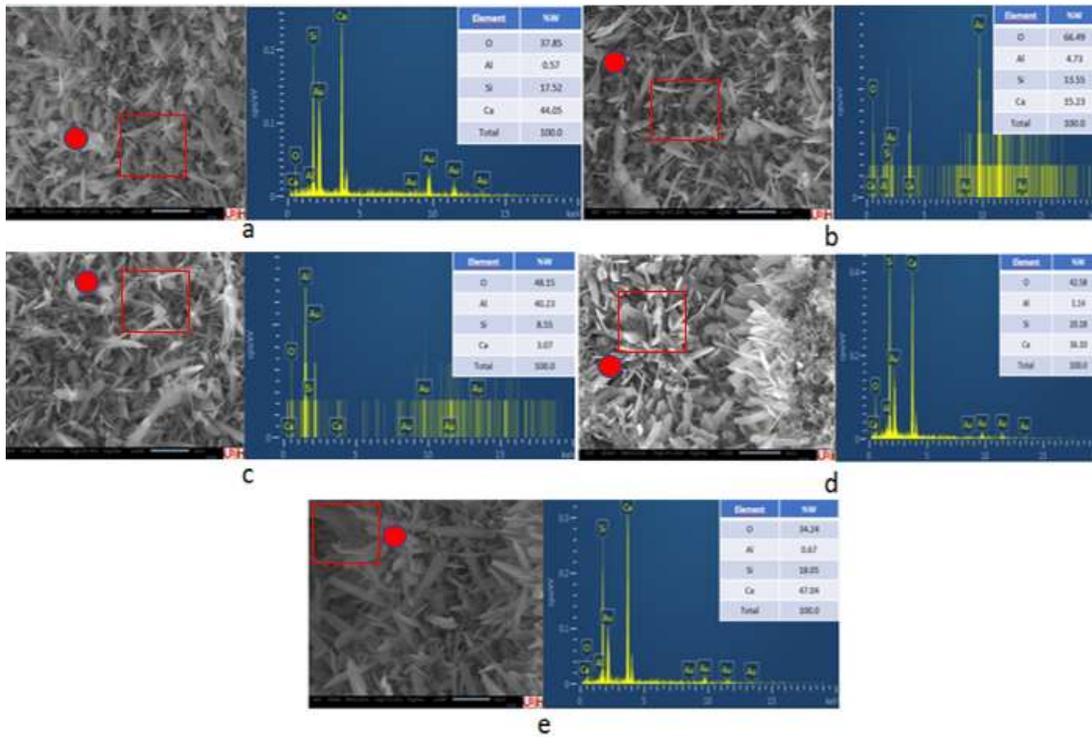


Figura 29. Fotomicrografías de tobermorita obtenida por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $CaO/SiO_2=0.8$ en todos los casos y a) y 0% de diatomita, b) 0.10% de diatomita, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20%, y e) 0.25% de diatomita.

A continuación, se muestra la descripción detallada de los resultados obtenidos por MEB-EDS de la figura anterior correspondientes a la $CaO/SiO_2=0.8$ de cada una de las adiciones de diatomita.

- a) En la Figura 29a, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de diatomita, se puede observar la presencia de la fase melilita, la cual se forma como estructuras tetragonales escasamente definidas como agujas y precursoras de la tobermorita (que se encuentra en menor cantidad).
- b) En la figura 29b, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.10% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología

prismática escasamente definidas, con caras planas de forma laminar y bordes nítidos pero con baja saturación.

- c) En la figura 29c, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.15% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática escasamente definidas, con caras planas de forma laminar y bordes nítidos pero con baja saturación.

- d) En la figura 29d, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.20% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática bien definidas, con caras planas de forma laminar y con bordes más nítidos y de mayor saturación de todas las muestras.

- e) En la figura 29e, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.25% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática escasamente definidas, con caras planas de forma laminar y bordes nítidos pero con baja saturación.

Para esta misma figura, es importante mencionar la densificación de la microestructura de tobermorita teniendo un espesor constante y tamaños de placas entre 3 y 5 micras, lo que puede indicar que la estructura está terminando su proceso de formación, ya que se

observa muy poca fase melilita a diferencia de la 28d donde se observa una mejor conversión.

4.2.4 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase 3

Para el caso, cuando la relación de óxido fue de 0.8 y evaluándose la adición de 0, 0.1, 0.15, 0.2 y 0.25 % de diatomita, las imágenes correspondientes de las partículas de tobermorita observadas se muestran en la Figura 30.

En la figura 30 se presentan los resultados del análisis por MEB-EDS de las muestras de AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$, observándose la morfología típica de la tobermorita y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constantes la composición de $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ y variando el porcentaje de diatomita natural como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %. Así mismo, en todos los casos se muestra la morfología típica de los cristales de tobermorita. Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

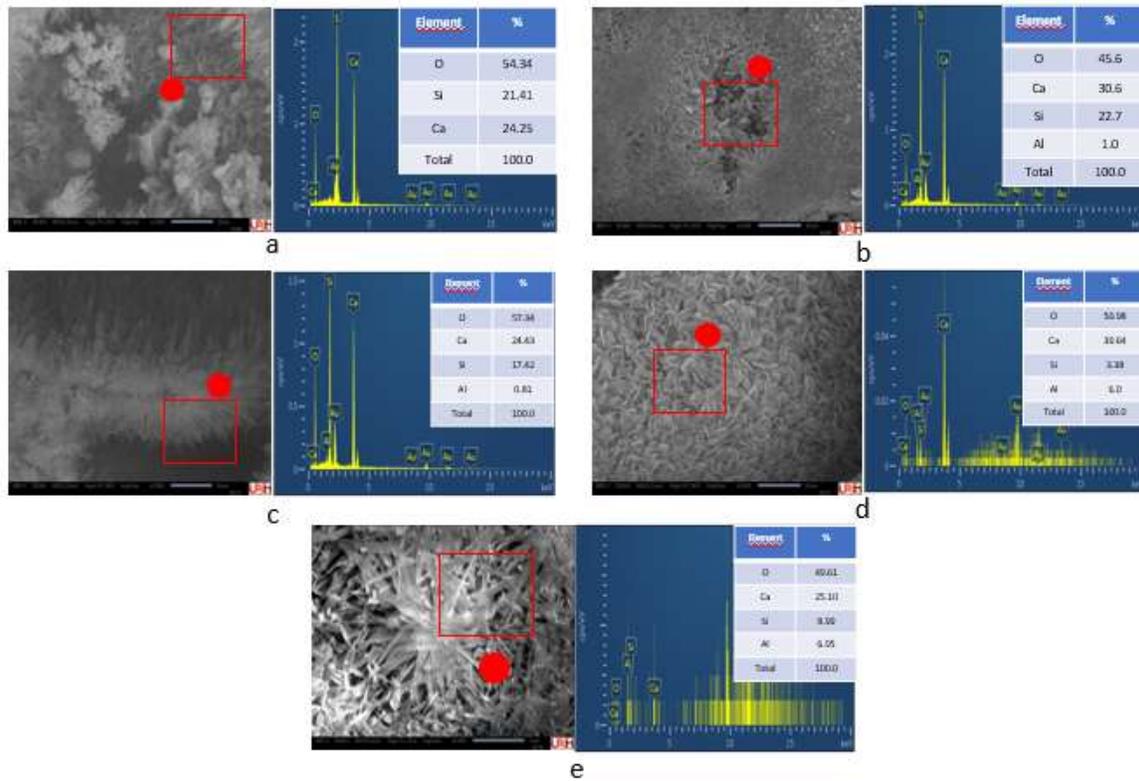


Figura 30. Fotomicrografías de tobermorita obtenida por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=1.0$ en todos los casos y a) y 0% de diatomita, b) 0.10% de diatomita, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20%, y e) 0.25% de diatomita.

A continuación, se muestra la descripción detallada de los MEB correspondientes a la $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$ de cada una de las adiciones de diatomita.

- a) En la Figura 30a, se aprecian diversas formaciones en ésta imagen. Al centro, formación tendencia al idiomorfismo y alrededor hábito tabular y acicular, al igual que dendrítico.
- b) En la figura 30b, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.10% diatomita base sólidos totales. Se pueden observar dos hábitos, al centro del tipo tabular y en la periferia de tipo acicular típico de la tobermorita de acuerdo con la bibliografía comparada.

- c) En la figura 30c, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.15% diatomita base sólidos totales. Se observan cristales con hábito del tipo acicular, filiforme y plumoso agrupados a lo largo de una formación central.

- d) En la figura 30d, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.20% diatomita base sólidos totales. Se observan en la totalidad de la imagen cristales de hábito acicular típico de la tobermorita de acuerdo con la bibliografía comparada.

- e) En la figura 30e, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.25% diatomita base sólidos totales. Se observan en la totalidad de la imagen cristales de hábito tabular característica de la etringita.

Para esta misma figura, es importante mencionar la densificación de la microestructura de tobermorita teniendo un espesor constante y tamaños de placas entre 3 y 5 micras, lo que puede indicar que la estructura está terminando su proceso de formación, ya que se observa muy poca fase melilita a diferencia de la 29d donde se observa una mejor conversión.

4.3 Resistencia a la compresión de AAC con diatomita

La figura 31, presenta los resultados obtenidos de resistencia a la compresión (MPa) del AAC mediante una prensa marca TEST-FORM de la Empresa Aircrete México S.A.P.I. de C.V.

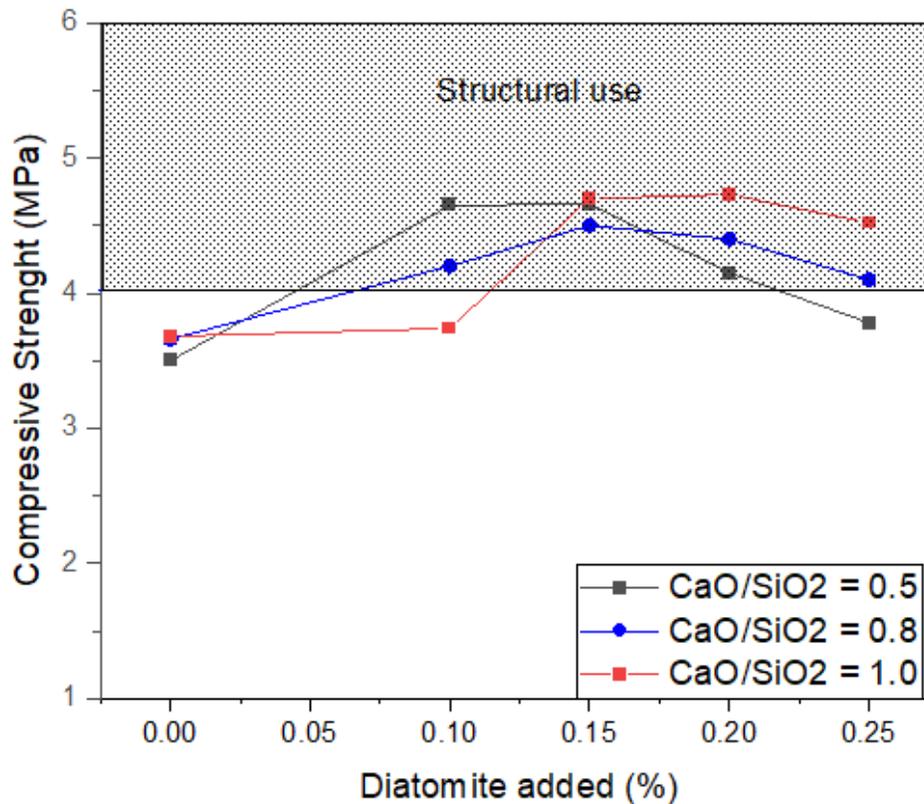


Figura 31. Resultados de resistencia a la compresión en muestras de AAC relacionada con el % de diatomita añadida.

Como puede verse en la figura anterior, se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron conforme a las normas ASTM-C-1386 y EN-77210-1999 mediante probetas cúbicas de AAC de 10x10cm, con caras pulidas y un porcentaje de humedad de 6% a 20°C y una velocidad de aplicación entre 0.05-0.1 N/mm²s.

La línea negra representa los resultados de compresión obtenidos manteniendo una relación de óxidos de 0.5, la línea azul representa los resultados de compresión cuando la relación de óxidos es de 0.8 y la línea roja representa los resultados de compresión cuando la relación de óxidos es de 1.0.

En todos los casos, el primer punto es la muestra blanco, la cual no contiene aditivo.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que con la adición de 0.15 % de aditivo en un AAC con una relación $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, alcanzó la máxima resistencia.

Por otra parte, se determinó que con la adición de 0.20 % de aditivo en un AAC con una relación $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ alcanzó la máxima resistencia.

Finalmente, en la tercera fase de la experimentación, la adición de 0.15% de adición de diatomita alcanzó el valor más alto de resistencia a la compresión con una relación de $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0$.

Estos resultados, son congruentes de acuerdo con la tabla 9, en relación al porcentaje de tobermorita 11Å formada.

Los resultados comparativos de la resistencia fueron presentados en la tabla 10.

4.3 AAC ADITIVADO CON LIGNOSULFONATO

Los superplastificantes (SP), también conocidos como superfluidizantes, super-reductores de agua o reductores de agua de alto rango, son polímeros naturales o artificiales solubles en agua que se utilizan a menudo en las industrias del hormigón como agentes dispersantes (Mollah, Yu, & Schennach, 2000) y uno de los más utilizados es el lignosulfonato de sodio.

Se han utilizado ampliamente en la tecnología de concreto con el fin de modificar su reología logrando un concreto altamente fluido, manteniendo las propiedades mecánicas y/o disminuyendo la relación agua/cemento para mejorar la resistencia a compresión y la durabilidad.

Parece haber un acuerdo general en la literatura de que la acción dispersiva del SP es causada por la adsorción de moléculas de SP en la superficie de los granos de cemento durante la reacción de hidratación inicial (Mollah, Yu, & Schennach, 2000).

El efecto de los superplastificantes en las propiedades físicas y mecánicas del CPO ha sido estudiado en el concreto tradicional, pero no en el AAC.

Para el caso específico del lignosulfonato, es importante mencionar que Es una sal sódica de los lignosulfonatos, derivado soluble de la lignina (biopolímero complejo resultante del proceso de la madera) y se ha usado como aditivo para el concreto tradicional.

Aunque se trata de una macromolécula compleja puede cristalizarse bajo ciertas condiciones como son la evaporación lenta en dilución con agua, cuando se encuentra en altas concentraciones (alrededor del 40-50%), uso a una temperatura baja o en presencia de algunas sales inorgánicas.

Para la presente investigación, no es aplicable ninguna de las condiciones antes mencionadas, lo cual asegura un manejo sencillo del lignosulfonato en combinación con el AAC, por lo que, para abordar el tema en el concreto celular autoclaveado aditivado con lignosulfonato de sodio, se propuso la variación de la relación de óxido de calcio/óxido de silicio (CaO/SiO_2) en el concreto celular autoclaveado (AAC) con el objetivo de incrementar el porcentaje de formación de la tobermorita 11 Å y la adición de la diatomita natural para mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión del AAC.

La elección de la relación de 0,5 fue para evaluar el papel de la adición de lignosulfonato para la buena formación de tobermorita 11 Å, la cual podría contribuir con una cantidad adecuada de Si para su precipitación. Sin embargo, primero solo se formó la tobermorita 9 Å, no como se reporta en la literatura donde durante la síntesis de la tobermorita se usó una relación de óxido de 0.83 [11], bastante similar a la aquí utilizada, que fue de 0.8 dando excelentes resultados al agregar. 0,2 % de diatomita.

4.3.1 Composición mineralógica de AAC con lignosulfonato de sodio por DRX.

En la figura 32, se presentan los resultados de los análisis de difracción de Rayos X del aditivo lignosulfonato utilizado en la presente investigación, éste DRX, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, utilizando un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

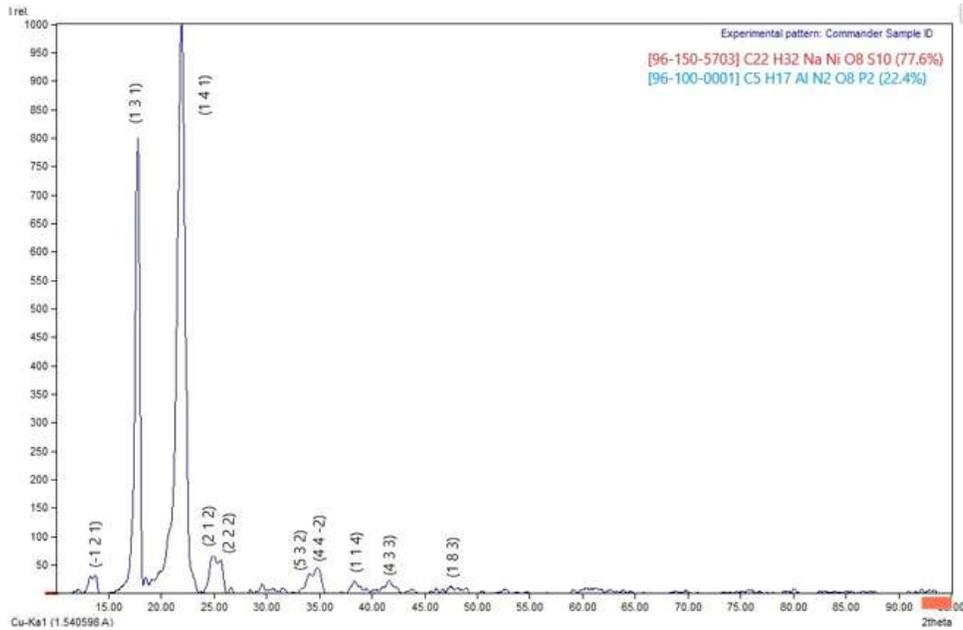


Figura 32 Difractograma de Rayos X de lignosulfonato

Como puede observarse en la figura 32, el difractograma muestra el espectro donde se pueden identificar las fases típicas del lignosulfonato de sodio.

De acuerdo con el espectrograma anterior, se corrobora que la especie analizada presenta los elementos químicos propios de este aditivo.

4.3.1.1. Composición mineralógica de AAC con lignosulfonato de sodio por DRX, fase 1

A continuación, en la figura 33 se presentan los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $K_{\alpha 1}$, con un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

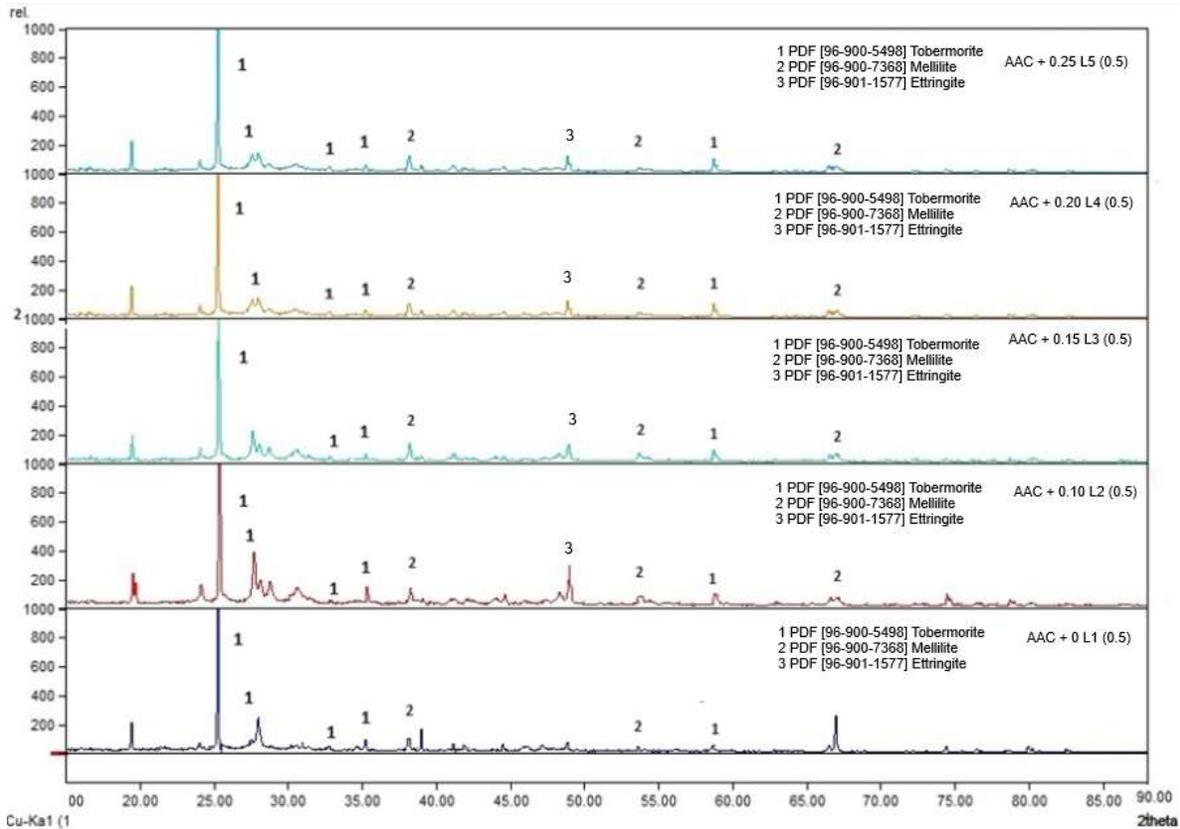


Figura 33. Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ a diferentes concentraciones de lignosulfonato de sodio, número 1 con 0%, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25.

En esta Figura se muestra una relación de óxidos de $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ y de manera descendente se puede observar que:

L1 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 57.81% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9\AA , pero una compresión insuficiente de 2.91MPa, inferior a los 4MPa esperado.

L2 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 60.43% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9\AA , pero una compresión insuficiente de 3.89MPa, inferior a los 4MPa esperado.

L3 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 58.18% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9Å, pero una compresión insuficiente de 3.54MPa, inferior a los 4MPa esperado.

L4 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.20% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 49.87% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9Å, pero una compresión insuficiente de 3.53MPa, inferior a los 4MPa esperado.

L5 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 60.12% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9Å, pero una compresión insuficiente de 3.96MPa, ligeramente inferior a los 4MPa esperado.

De manera general, puede observarse un valor de cristalinidad estable, pero no logró formarse el tamaño de cristal de 11Å, excepto en la adición 0.10% de adición de lignosulfonato de sodio.

4.3.1.2. Composición mineralógica de AAC con lignosulfonato por DRX, fase 2

Al igual que en el análisis anterior, la información obtenida por esta técnica, permitió determinar la estructura cristalina mediante el método analítico para una estructura ortorrómbica (Suryanarayana, 1998).

La figura 34, presenta los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, con un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

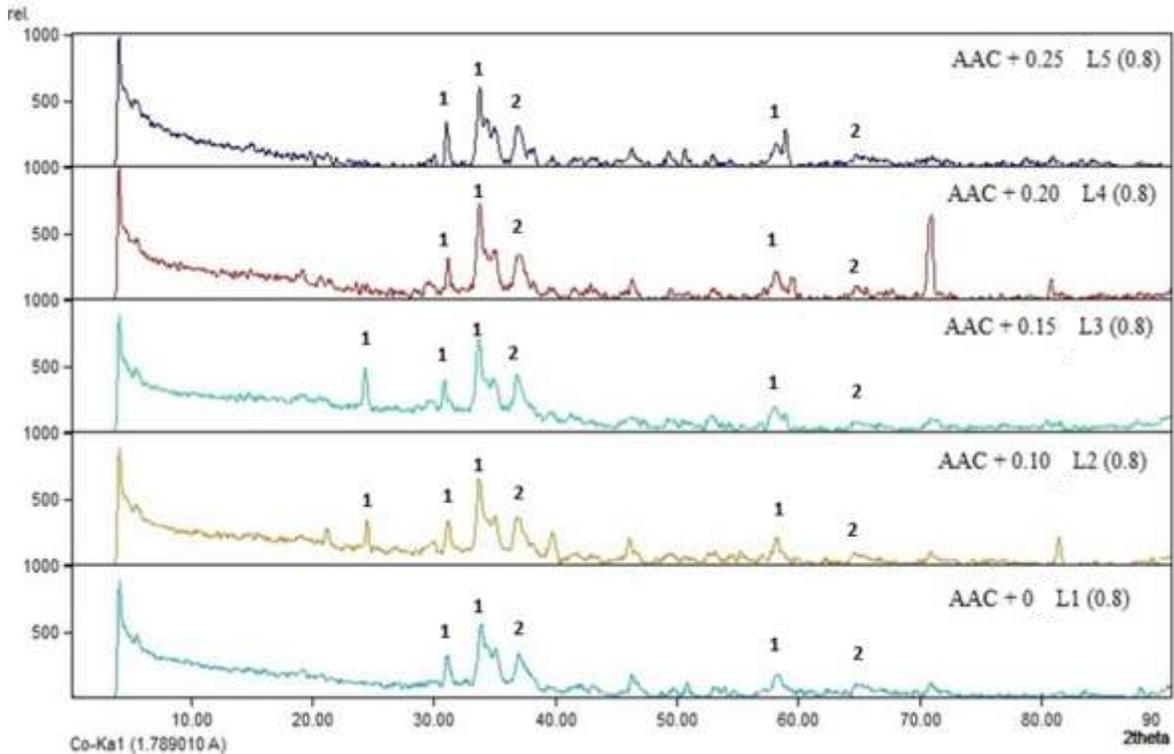


Figura 34 Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ a diferentes concentraciones de lignosulfonato de sodio, numero 1 con 0% muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%.

En esta Figura 34, se muestra una relación de óxidos de $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ y de manera descendente se puede observar que:

L1 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 54.12% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9\AA , pero una compresión insuficiente de 3.68MPa, inferior a los 4MPa esperado.

L2 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 62.38% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9\AA , pero una compresión insuficiente de 3.74MPa, inferior a los 4MPa esperado.

L3 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 70.12% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 11Å, pero una compresión insuficiente de 4.2MPa, ligeramente superior a los 4MPa esperado.

L4 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.20% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 68.35% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 11Å, pero una compresión insuficiente de 4.73MPa, superior a los 4MPa esperado.

L5 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 63.27% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 12Å, pero una compresión insuficiente de 4.52MPa, superior a los 4MPa esperado.

De manera general, puede observarse un valor de cristalinidad más variable, pero no logró formarse el tamaño de cristal de 11Å, excepto en la adiciones 0.15% y 0.20% de adición de lignosulfonato de sodio, mientras que en la adición de 0.25% el tamaño de cristal formado fue de 12Å.

Como se puede observar en la primera fase de la experimentación con lignosulfonato de sodio con una relación $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, la mayor resistencia a la compresión alcanzada se obtuvo mediante la adición de 0.25% Ls, sin embargo, no fue suficiente para alcanzar el valor mínimo de compresión esperado de 4 MPa.

Por otra parte, en la segunda parte de la experimentación con lignosulfonato de sodio con una relación $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, la mayor resistencia a la compresión alcanzada se obtuvo mediante la adición de 0.20% Ls con un valor de 4.73MPa.

Además, en esta fase, a partir de la adición de 0.15% de Ls se obtuvo una resistencia a la compresión superior a los 4MPa, lo cual corrobora la importancia de una mayor relación de óxidos.

En la Tabla 11 se resumen los valores obtenidos mediante el análisis de datos por la técnica de difracción de rayos X.

Tabla 11. Resultados comparativos de porcentaje de formación de tobermorita, valores de resistencia a la compresión y parámetros de cristalinidad con adición de lignosulfonato de sodio.

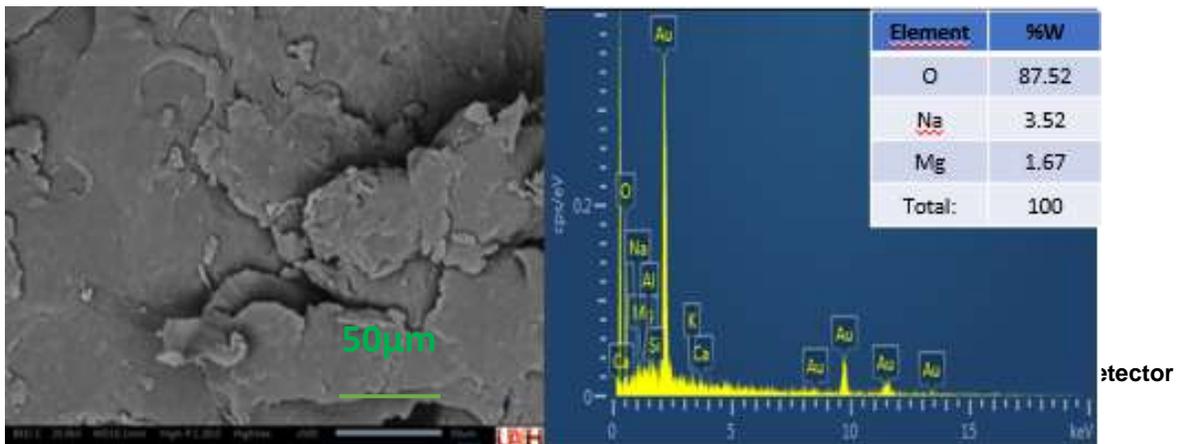
| Fase de experimentación | Clave Identificación | % lignosulfonato de sodio | Resist. Compr. (MPa) | Cristalinidad (% tobermorita) | Tamaño de cristal |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------|
| Ligno_0.5 | D1_0.5 | 0 | 2.91 | 57.81 | 9.3 |
| | D2_0.5 | 0.1 | 3.89 | 60.43 | 9.3 |
| | D3_0.5 | 0.15 | 3.54 | 58.18 | 9.3 |
| | D4_0.5 | 0.2 | 3.53 | 49.87 | 9.3 |
| | D5_0.5 | 0.25 | 3.96 | 60.12 | 9.3 |
| Ligno_0.8 | D1_0.8 | 0 | 3.68 | 54.12 | 9.3 |
| | D2_0.8 | 0.1 | 3.74 | 62.38 | 9.3 |
| | D3_0.8 | 0.15 | 4.2 | 70.12 | 11.3 |
| | D4_0.8 | 0.2 | 4.73 | 68.35 | 11.3 |
| | D5_0.8 | 0.25 | 4.52 | 63.27 | 12.0 |

Como puede verse en esta tabla 11, el aumento de la relación de óxidos CaO/SiO₂ de 0.5 a 0.8 fue determinante para lograr una formación del tamaño de cristal de 11Å, el cual es el que con base en la bibliografía consultada ofrece resistencia a la compresión.

De manera general, el lignosulfonato de sodio en algunas de sus adiciones e incrementando la relación de óxidos, proporciona valores superiores de compresión y alcanza a formar el cristal deseado.

4.3.2 Caracterización de AAC con lignosulfonato de sodio por MEB-EDS.

En la figura 35, se presentan los resultados del análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.



Como puede verse el lignosulfonato presenta una forma del tipo lamelar micáceo con granos xenomorfos (ameboides) y el EDS permite la identificación de los elementos químicos característicos del lignosulfonato de sodio (O, Na y Mg).

4.3.2.1 Composición química y morfología de AAC con diatomita por MEB-EDS, Fase

1

En la Figura 36, se presenta los resultados de la morfología del AAC aditivado con lignosulfonato de sodio obtenidas por análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

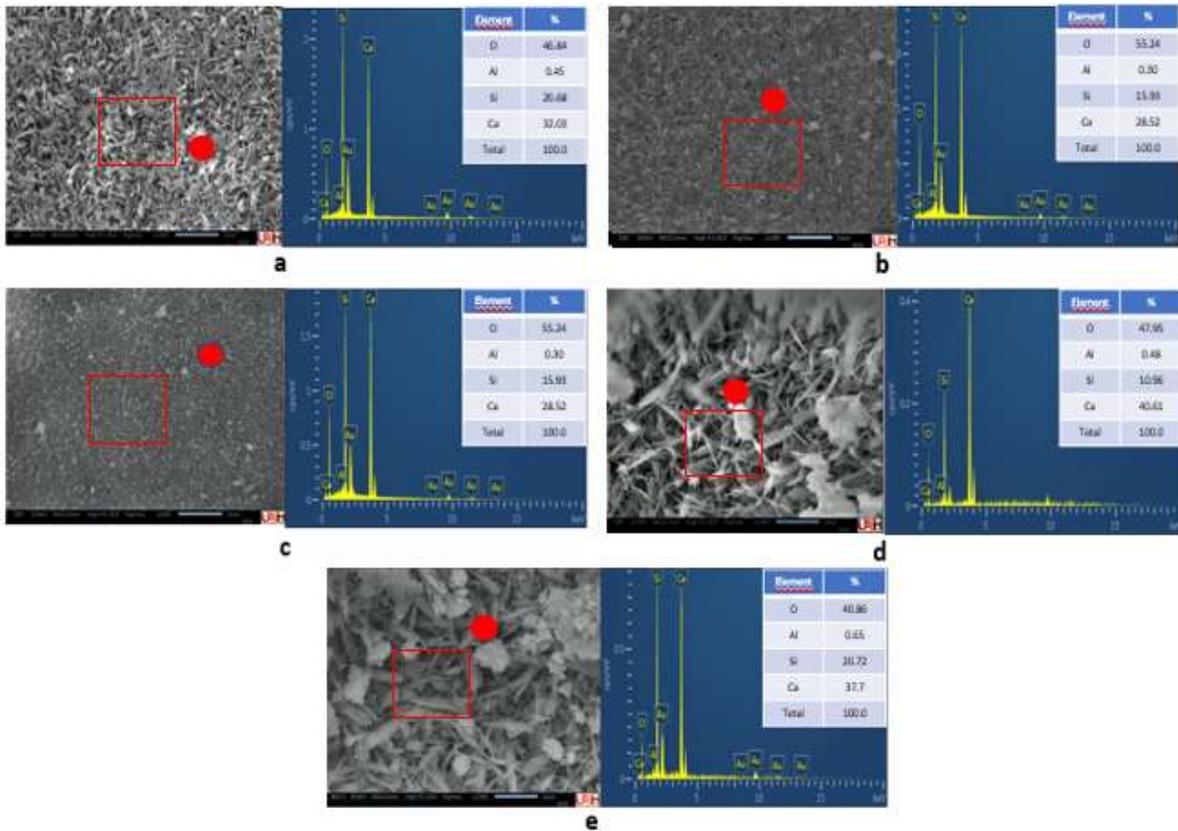


Figura 36 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ en todos los casos y a) y 0% de ls, b) 0.10% de ls, c) 0.15% de ls, d) 0.20% de ls, y e) 0.25% de ls.

Para el caso, cuando la relación de óxido fue de 0.5 y evaluándose la adición de 0, 0.1, 0.15, 0.2 y 0.25 % de lignosulfonato de sodio, las imágenes correspondientes de las partículas de tobermorita observadas como se observan en la figura 35.

Así mismo en esta figura 35 se presentan los resultados del análisis por MEB-EDS de las muestras de AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, observándose la morfología típica de la tobermorita 11Å y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constantes la composición de $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ y variando el porcentaje de lignosulfonato de sodio como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %. Así mismo, en todos los casos se muestra la

morfología típica de los cristales de tobermorita. Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

En la Figura 36a, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de lignosulfonato de sodio, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Estas partículas son más grandes y tienen bordes menos definidos comparados con los agregados en concreto convencional.

En la figura 36b, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.10% lignosulfonato de sodio base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática escasamente definidas, con caras planas de forma laminar y bordes nítidos pero con baja saturación.

En la figura 36c, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.15% lignosulfonato de sodio base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática escasamente definidas, con caras planas de forma laminar y bordes nítidos pero con baja saturación.

En la figura 36d, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.20% lignosulfonato de sodio base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática bien definidas, con caras planas de forma laminar y bordes nítidos y de mayor saturación.

En la figura 36e, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.25% lignosulfonato de sodio base sólidos totales. Se pueden observar las típicas formaciones

filiformes con caras planas de forma laminar y bordes nítidos que corresponden a la tobermorita 11Å.

4.3.2.2 Composición química y morfología de AAC con lignosulfonato de sodio por MEB-EDS, Fase 2

En la figura 36, se presenta los resultados de la morfología del AAC aditivado con lignosulfonato de sodio obtenidas por análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

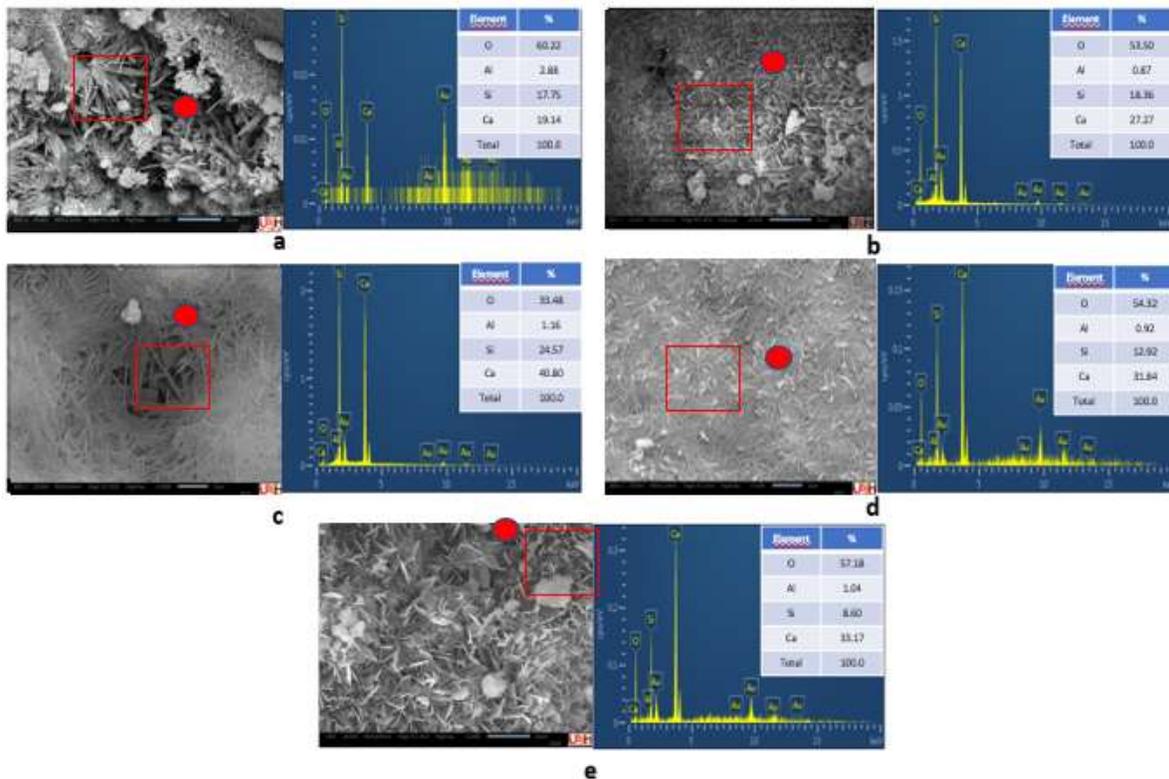


Figura 37 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.8$ en todos los casos y a) y 0% de ls, b) 0.10% de ls, c) 0.15% de diatomita, d) 0.20% de ls, y e) 0.25% de ls.

En la figura anterior se presentan los resultados del análisis por MEB-EDS de las muestras de AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, observándose la morfología típica de la tobermorita y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados

a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constantes la composición de $\text{CaO/SiO}_2=0.8$ y variando el porcentaje de lignosulfonato de sodio como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %. Así mismo, en todos los casos se muestra la morfología de los cristales de tobermorita. Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

4.3.3 Resistencia a la compresión comparativa de AAC con lignosulfonato de sodio.

En la figura 37, se presentan los resultados obtenidos de resistencia a la compresión (MPa) del AAC mediante una prensa marca TEST-FORM de la Empresa Aircrete México S.A.P.I. de C.V.

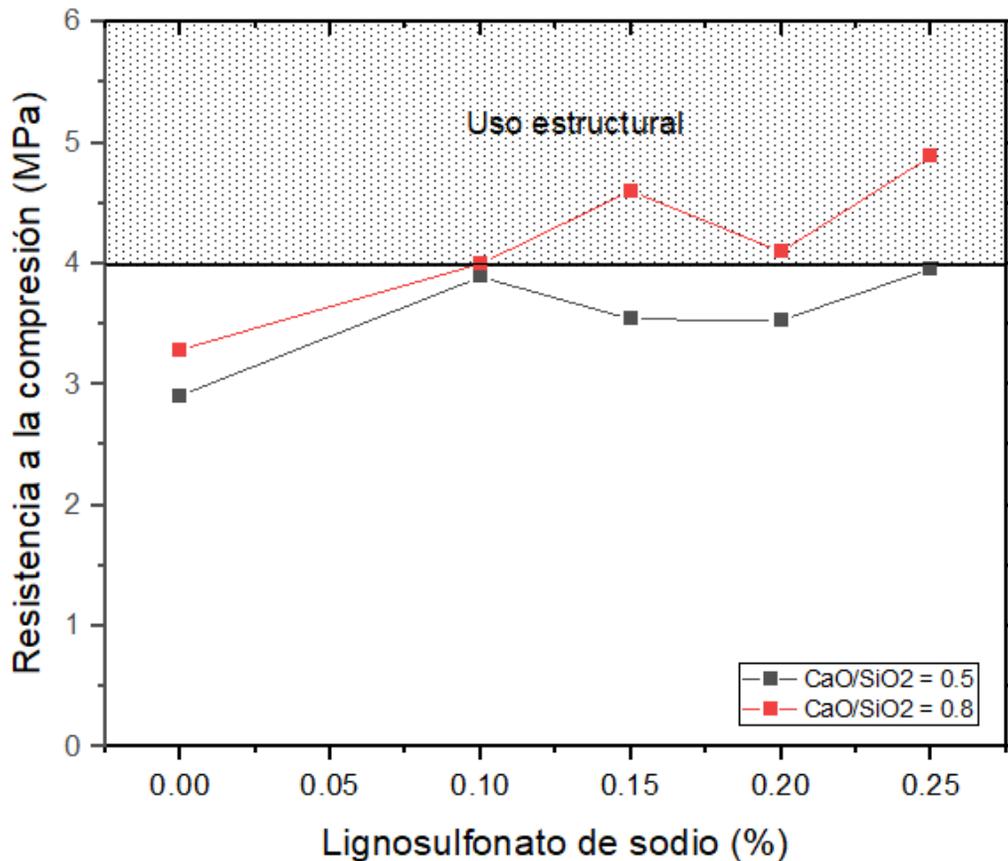


Figura 38 Resultados de resistencia a la compresión para AAC aditivado con lignosulfonato de sodio, con relación de CaO/SiO₂ de 0.5 y 0.8

Los ensayos de resistencia a la compresión mostrados en la figura anterior, se realizaron conforme a la norma ASTM C-1386 mediante probetas cúbicas de AAC de 10x10cm, con caras pulidas y un porcentaje de humedad de 6% a 20°C y una velocidad de aplicación entre 0.05-0.1 N/mm²s, donde se determinó que con la adición de 0.25% de aditivo alcanzó la máxima resistencia, Estos resultados, son congruentes de acuerdo con la tabla 11 en relación al porcentaje de tobermorita 11Å formada.

De acuerdo con los valores de la Tabla 11 y la Figura 37, pueden resumirse los resultados obtenidos para el AAC se obtuvieron para el aditivo lignosulfonato de sodio, obteniendo también el más alto contenido de tobermorita 11Å la cual va relacionada íntimamente con la resistencia del material.

4.4 AAC ADITIVADO CON PERLITA

Tomando en cuenta las aportaciones de (Rózycka & Pichor, 2016) sobre el efecto de la adición de residuos de perlita sobre las propiedades del AAC, se retomó tema para la presente investigación con la finalidad de conocer el impacto de la adición de perlita no calcinada en el AAC.

Para abordar el tema en el concreto celular autoclaveado aditivado con perlita, al igual que se realizó con los aditivos anteriores, se propuso la variación de la relación de óxido de calcio/óxido de silicio (CaO/SiO_2) en el concreto celular autoclaveado (AAC) para incrementar el porcentaje de formación de la tobermorita 11Å y mejorar la resistencia a la compresión del AAC.

La elección de la relación de 0,5 fue para evaluar el papel de la adición de perlita para la buena formación de tobermorita 11Å , la cual podría contribuir con una cantidad adecuada de Si para su precipitación.

4.3.1 Composición mineralógica de AAC con perlita por DRX.

En la figura 38, se muestran los resultados de los análisis de difracción de Rayos X del aditivo perlita utilizado en la presente investigación, éste DRX, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, utilizando un difractómetro de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

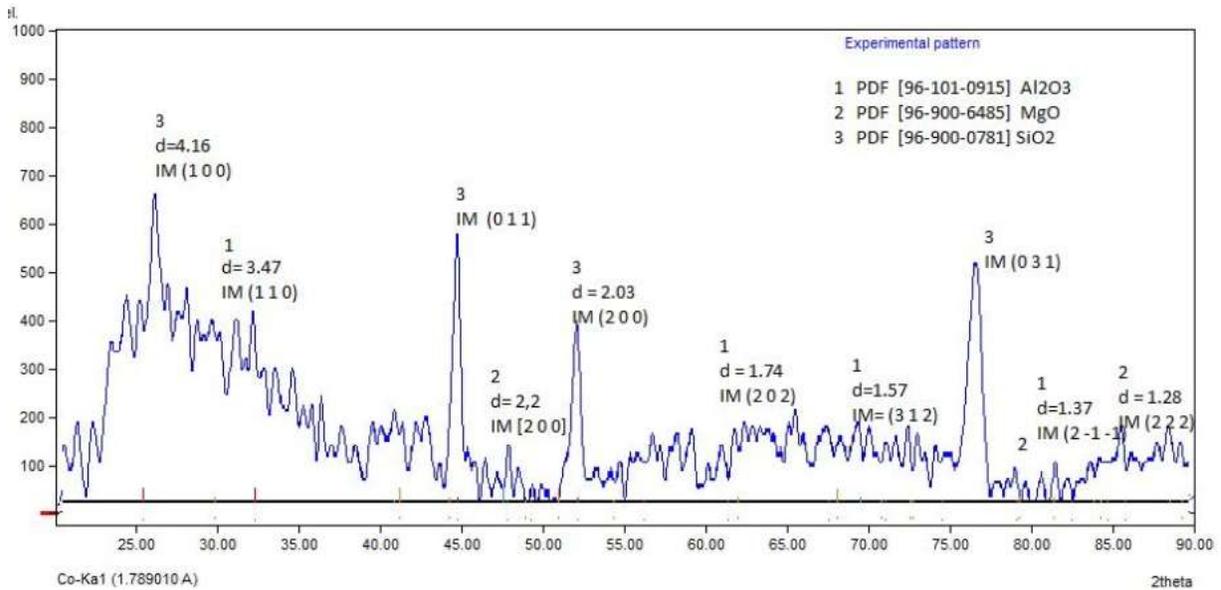


Figura 39 Difractograma de Rayos X de perlita

Como puede observarse en la figura 38, el difractograma muestra el espectro donde se pueden identificar las fases de minerales como son: Cuarzo con PDF [96-900-0781], Pargasita con PDF [96-900-4667], Dióxido de silicio con PDF [96-153-1933] y Ferroaxinita con PDF [96-900-0816].

De acuerdo con el espectrograma anterior, se corrobora que la especie analizada presenta los elementos químicos propios de la perlita.

4.3.1.1. Composición mineralógica de AAC con perlita por DRX, fase 1

A continuación, en la figura 39 se presentan los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC, obtenido mediante el difractor de óptica simple $K_{\alpha 1}$, con un difractor de la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

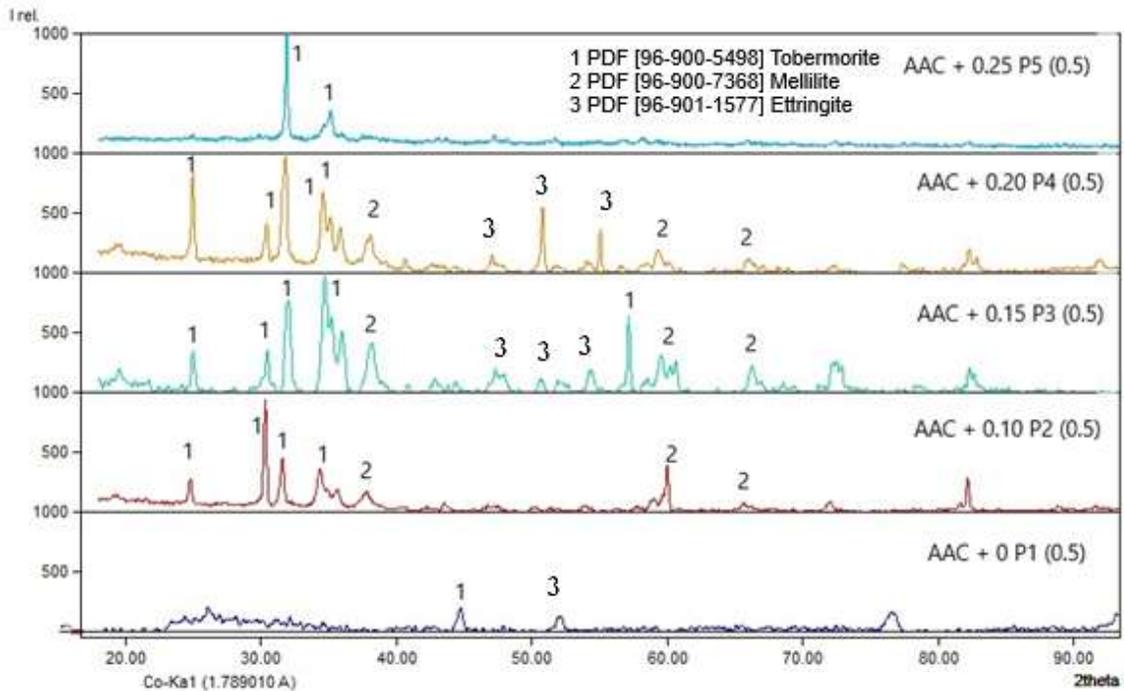


Figura 40 Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ a diferentes concentraciones de perlita, numero 1 sin perlita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%.

En esta Figura 39, se muestra una relación de óxidos de $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ y de manera descendente se puede observar que:

P1 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 55.17% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9\AA , pero una compresión insuficiente de 3.27MPa, inferior a los 4MPa esperado.

P2 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 63.52% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 14\AA , pero una compresión insuficiente de 3.7MPa, inferior a los 4MPa esperado.

P3 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 61.45% de cristalinidad en el valor que presenta un

tamaño de cristal de 14\AA , pero una compresión insuficiente de 3.77MPa , inferior a los 4MPa esperado.

P4 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.20% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 59.87% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 14\AA , pero una compresión insuficiente de 3.81MPa , inferior a los 4MPa esperado.

P5 (0.5).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25% de lignosulfonato de sodio añadida, tiene 55.12% de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de 9\AA , pero una compresión insuficiente de 2.85MPa , inferior a los 4MPa esperado.

Como se puede observar en la primera fase de la experimentación con lignosulfonato de sodio con una relación $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, la mayor resistencia a la compresión alcanzada se obtuvo mediante la adición de 0.20% Ls, sin embargo, no fue suficiente para alcanzar el valor mínimo de compresión esperado de 4MPa .

Por otra parte, también es importante mencionar que el tamaño de cristal formado en esta fase fue el 14\AA , que no es el deseado para conferir resistencia a la compresión adecuada y durabilidad del material.

4.3.1.2. Composición mineralógica de AAC con perlita por DRX, fase 2

Al igual que en el análisis anterior, la información obtenida por ésta técnica, permitió determinar la estructura cristalina mediante el método analítico para una estructura ortorrómbica (Suryanarayana, 1998).

La figura 40, presenta los difractogramas comparativos de las 5 muestras de la síntesis del AAC, obtenido mediante el difractómetro de óptica simple $k_{\alpha 1}$, con un difractómetro de

la marca INEL Equinox 2000 con una mezcla de gas a base de Argón-Etano y un voltaje de 220V.

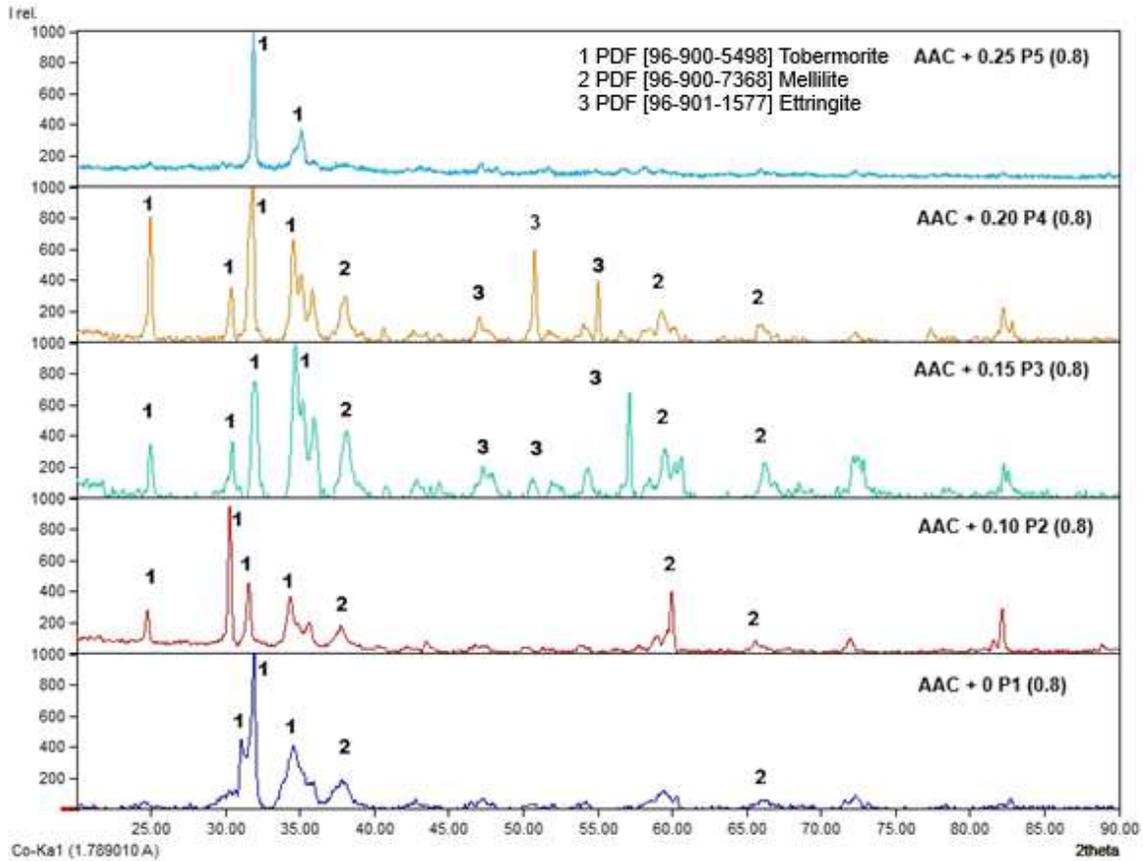


Figura 41 Resultados comparativos de la síntesis del AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ a diferentes concentraciones de perlita, numero 1 sin perlita, muestra 2 con 0.1 %, 3 con 0.15 %, 4 con 0.20 % y espectro 5 con 0.25%.

En esta Figura 40, se muestra una relación de óxidos de $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ y de manera descendente se puede observar que:

P1 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0% de perlita añadida, tiene 71.12 % de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de Å, pero una compresión insuficiente de 3.63 MPa, inferior a los 4MPa esperado.

P2 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.10% de perlita añadida, tiene 69.16 % de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de Å, pero una compresión insuficiente de 3.75 MPa, inferior a los 4MPa esperado.

P3 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.15% de perlita añadida, tiene 72.84 % de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de Å, pero una compresión insuficiente de 4.16 MPa, ligeramente superior a los 4MPa esperado.

P4 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.20% de perlita añadida, tiene 70.61 % de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de Å, pero una compresión insuficiente de 4.15 MPa, ligeramente superior a los 4MPa esperado.

P5 (0.8).- Es el espectro que, corresponde a la síntesis del AAC con 0.25% de perlita añadida, tiene 63.19 % de cristalinidad en el valor que presenta un tamaño de cristal de Å, pero una compresión insuficiente de 3.78 MPa, inferior a los 4MPa esperado.

Como se puede observar en la primera fase de la experimentación con perlita con una relación $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, la mayor resistencia a la compresión alcanzada se obtuvo mediante la adición de 0.15% y 0.20%, sin embargo, no es un valor muy superior a los 4MPa lo que podría suponer un riesgo para una producción continua, ya que puede estar sujeta a variaciones propias de la materia prima.

Por otra parte, también es importante mencionar que el tamaño de cristal formado en esta fase fue mayoritariamente el 14Å porque solamente en la adición del 0.15% se obtuvo un tamaño de cristal de 9Å, que no es el deseado para conferir resistencia a la compresión adecuada y durabilidad del material.

Con la información obtenida por esta técnica, fue posible realizar el cálculo del porcentaje de formación de tobermorita 9Å, 11 Å y 14 Å en cada una de las muestras, la cual se presenta más adelante.

A continuación, en la Tabla 12, se presenta en la primera columna la relación de óxidos, correspondiente a 0.5. En la segunda columna se observa la clave de identificación, mientras que la tercera columna muestra el porcentaje de adición de perlita aplicada en cada caso, las columnas 4 a 6 muestran los resultados de resistencia a la compresión, porcentaje de cristalinidad y tamaño de cristal respectivamente para cada una de las muestras.

Del mismo modo, puede observar que, para la primera fase de la experimentación, donde $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, la adición de 0.20 % de perlita natural en la síntesis del hormigón celular tratado en autoclave aumenta el valor de la resistencia a la compresión, mientras que para la segunda fase donde $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, la adición de 0.15% de perlita natural en el AAC presenta el valor más elevado de compresión de todos los experimentos.

Por otra parte, como puede observarse, en la sexta columna, la cristalinidad graficada contra el tamaño de cristal, nos muestra un incremento de formación de tobermorita 11Å en la experimentación donde $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, lo cual es congruente con los valores obtenidos.

En la **Tabla 12**, se presentan los resultados del tipo de tobermorita precipitada durante la síntesis de AAC, utilizando dos diferentes proporciones de óxido y añadiendo diferentes porcentajes de perlita. La Tabla está dividida en 2 secciones $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ y $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$.

Tabla 12 Resultados comparativos de porcentaje de formación de tobermorita, valores de resistencia a la compresión y parámetros de cristalinidad con adición de perlita.

| Fase de experimentación | Clave Identificación | % perlita | Resist. Compr. (MPa) | Cristalinidad (% tobermorita) | Tamaño de cristal |
|-------------------------|----------------------|-----------|----------------------|-------------------------------|-------------------|
| Perlita_0.5 | P1_0.5 | 0 | 3.27 | 55.17 | 9.3 |
| | P2_0.5 | 0.1 | 3.7 | 63.52 | 14.3 |
| | P3_0.5 | 0.15 | 3.77 | 61.45 | 14.3 |
| | P4_0.5 | 0.2 | 3.81 | 59.87 | 14.3 |
| | P5_0.5 | 0.25 | 2.85 | 55.12 | 9.3 |
| Perlita_0.8 | P1_0.8 | 0 | 3.63 | 71.12 | 12 |
| | P2_0.8 | 0.1 | 3.75 | 69.16 | 12 |
| | P3_0.8 | 0.15 | 4.16 | 72.84 | 11.3 |
| | P4_0.8 | 0.2 | 4.15 | 70.61 | 12 |
| | P5_0.8 | 0.25 | 3.78 | 63.19 | 14 |

La Tabla 12, muestra 2 secciones principales $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ y $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$ ubicadas en la columna número 1.

La segunda columna muestra los ID para la identificación de cada una de las muestras y posteriormente de las columnas 3 a 6 se puede observar el porcentaje de formación de cada uno de los tipos de tobermorita por muestra.

La tercera columna muestra los resultados a la compresión de cada una de las muestras, mientras que la quinta y sexta columna nos proporcionan información de la cristalinidad y el tamaño de cristal de las muestras obtenidas de la técnica de DRX.

Como se puede observar en la primera fase de experimentación, manteniendo una relación de $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$ los resultados de compresión fueron inferiores al valor mínimo esperado de 4MPa.

Por otra parte, en la segunda fase de experimentación, cuando la relación de óxidos $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, los resultados a la compresión fueron insuficientes, exceptuando las adiciones de 0.15 y 0.20 de perlita.

Estos resultados muestran que aún con el aumento en la relación de óxidos, no se cumplió el objetivo en la mejora de resistencia a la compresión ni en la formación del tamaño de cristal 11\AA deseado para obtener una resistencia y durabilidad del material.

4.3.2 Composición mineralógica de AAC con perlita por MEB-EDS.

En la figura 41, se presentan los resultados del análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

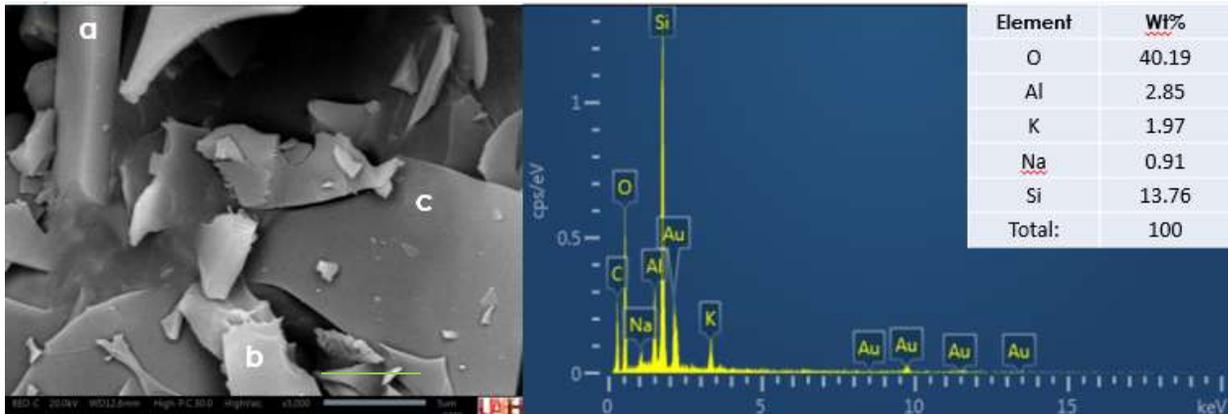


Figura 42 Fotomicrografía obtenida en un microscopio electrónico de barrido marca Jeol con detector EDS para la muestra de perlita a 500 aumentos y 20.0kV.

Como puede verse en esta figura, a) corresponde a un cristal automorfo de hábito prismático típico de la anortita.

Por otra parte, b) corresponde a una macla de Carlsbald típica de la albita de potasio $K(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$. Finalmente, en c), podemos observar un cristal auto morfo de hábito planar de fractura térmica concoidea vítrea típica del cuarzo.

4.3.2.1 Composición química y morfología de AAC con perlita por MEB-EDS, Fase 1

En la Figura 42, se presentan los resultados de la morfología del AAC aditivado con perlita obtenidas por análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

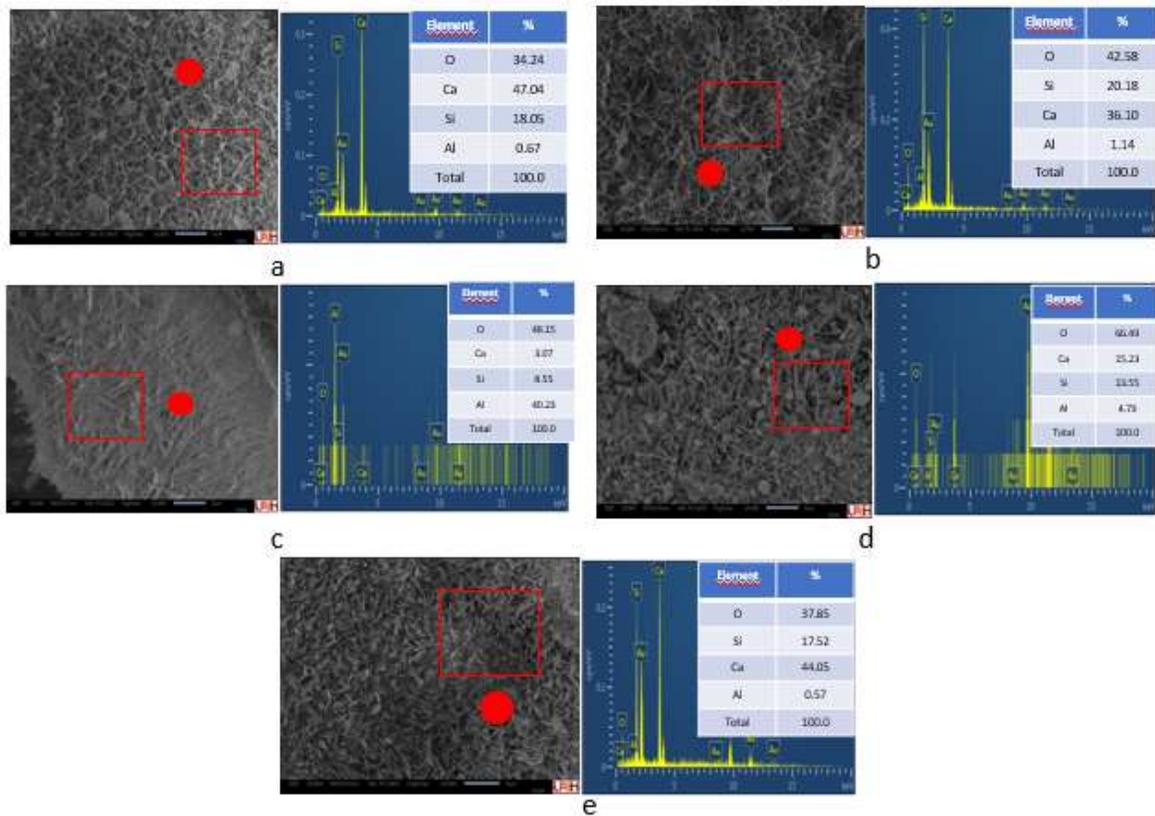


Figura 43 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ en todos los casos y a) y 0%, b) 0.10%, c) 0.15%, d) 0.20% y e) 0.25% de perlita.

Como se observa en la figura anterior, se presentan los resultados del análisis por MEB-EDS de las muestras de AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.5$, observándose la morfología típica de la tobermorita 11\AA y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constantes la composición de $\text{CaO/SiO}_2=0.5$ y variando el porcentaje de perlita como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %. Así mismo, en todos los casos se muestra la morfología

típica de los cristales de tobermorita. Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

En la Figura 42a, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de perlita, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Se observa en la imagen cristales tabulares en una morfología irregular anhedral. No es evidente la presencia de la estructura acicular característica de la tobermorita.

En la figura 42b, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.10% perlita base sólidos totales. Se pueden observar al igual que en la imagen anterior, una morfología irregular con borde nítidos de baja saturación pero no se distingue una estructura bien definida de tipo acicular.

En la figura 42c, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.15% perlita base sólidos totales. Se pueden observar en los típicos cristales prismáticos alargados, con formas tabulares o aciculares con una morfología prismática escasamente definida pero acorde con la formación característica de la tobermorita.

En la figura 42d, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.20% perlita base sólidos totales. Se observa en la imagen cristales tabulares en una morfología irregular anhedral. No es evidente la presencia de la estructura acicular característica de la tobermorita.

En la figura 42e, se presenta la morfología del AAC obtenido con una adición de 0.25% perlita base sólidos totales. Se observa en la imagen cristales tabulares en una morfología irregular anhedral. No es evidente la presencia de la estructura acicular característica de la tobermorita.

4.3.2.1 Composición química y morfología de AAC con perlita por MEB-EDS, Fase 2

En la Figura 43, se presenta los resultados de la morfología del AAC aditivado con perlita obtenidas por análisis MEB-EDS, obtenidos mediante el Microscopio electrónico de barrido de bajo vacío, marca JEOL modelo JSM-IT3000 de la Escuela Superior de Apan, UAEH a una resolución de 1000x y un voltaje de 20.0kV.

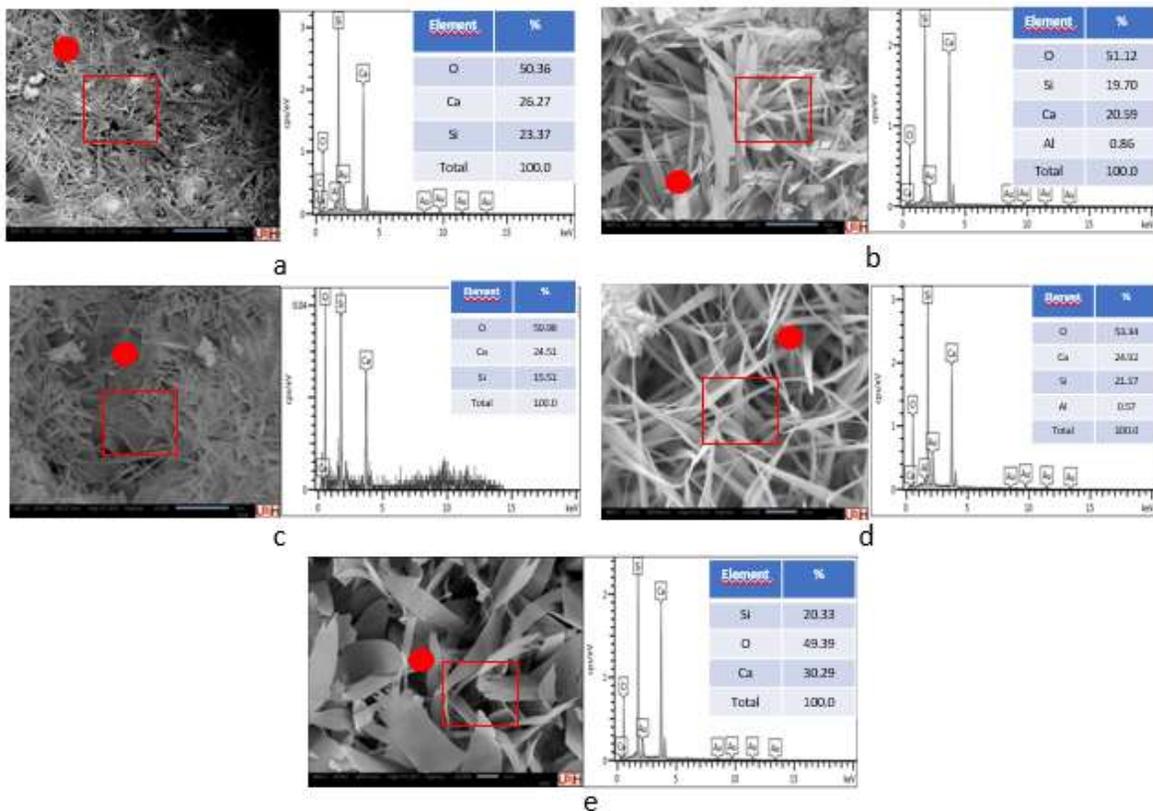


Figura 44 Fotomicrografías de AAC obtenidas por MEB (SE) x 2000 y espectro del análisis EDS con $\text{CaO/SiO}_2=0.8$ en todos los casos y a) y 0%, b) 0.10%, c) 0.15%, d) 0.20% y e) 0.25% de perlita.

En la figura 43, se presentan los resultados del análisis por MEB-EDS de las muestras de AAC con $\text{CaO/SiO}_2 = 0.8$, observándose la morfología típica de la tobermorita 11\AA y sus espectros correspondientes de los análisis semicuantitativos efectuados a las muestras elaboradas las cuales se desarrollaron manteniendo constantes la composición de

$\text{CaO/SiO}_2=0.5$ y variando el porcentaje de perlita como aditivo en rangos de 0 a 0.25 %.

Así mismo, en todos los casos se muestra la morfología típica de los cristales de tobermorita.

Por otra parte, el EDS corrobora la presencia de los elementos principales del silicato tricálcico (Ca, Si, Al y O).

En la Figura 44a, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de perlita, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Se pueden observar los típicos cristales prismáticos con formas aciculares aglomeradas.

En la figura 44b, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de perlita, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Se pueden observar los típicos cristales prismáticos con formas aciculares aglomeradas. Se evidencia una distribución homogénea de estas fases en la matriz cementicia, sugiriendo una buena hidratación del sistema. La morfología observada es consistente con la presencia de tobermorita 11 Å.

En la figura 44c, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de perlita, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Se pueden observar los típicos cristales prismáticos con formas aciculares aglomeradas. Se evidencia una distribución homogénea de estas fases en la matriz cementicia, sugiriendo una buena hidratación del sistema. La morfología observada es consistente con la presencia de tobermorita 11 Å.

En la figura 44d, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de perlita, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Se pueden observar los típicos cristales prismáticos con formas aciculares aglomeradas. Se evidencia una distribución

homogénea de estas fases en la matriz cementicia, sugiriendo una buena hidratación del sistema. La morfología observada es consistente con la presencia de tobermorita 11 Å. En la figura 44e, se presenta la morfología del AAC obtenido sin adición de perlita, tomada a un aumento de 2000x, revela las distintas fases y componentes del material con énfasis en los agregados ligeros y la matriz de cemento. Se pueden observar los típicos cristales prismáticos con formas fibrosas aglomeradas de mayor superficie. Se evidencia una distribución homogénea de estas fases en la matriz cementicia, sugiriendo una buena hidratación del sistema. La morfología observada es consistente con la presencia de tobermorita 11 Å.

4.3.3 Resistencia a la compresión de AAC con perlita por MEB-EDS.

En la figura 44, que muestra los resultados obtenidos de resistencia a la compresión (MPa) del AAC mediante una prensa marca TEST-FORM de la Empresa Aircrete México S.A.P.I. de C.V., El AAC ensayado, fue aditivado con perlita (P).

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron conforme a la norma ASTM C-1386 mediante probetas cúbicas de AAC de 10x10cm, con caras pulidas y un porcentaje de humedad de 6% a 20°C y una velocidad de aplicación entre 0.05-0.1 N/mm²s, donde se determinó que con la adición de 0.20% de aditivo alcanzó la máxima resistencia. Estos resultados, son congruentes de acuerdo con la tabla 13, en relación al porcentaje de tobermorita 11Å formada.

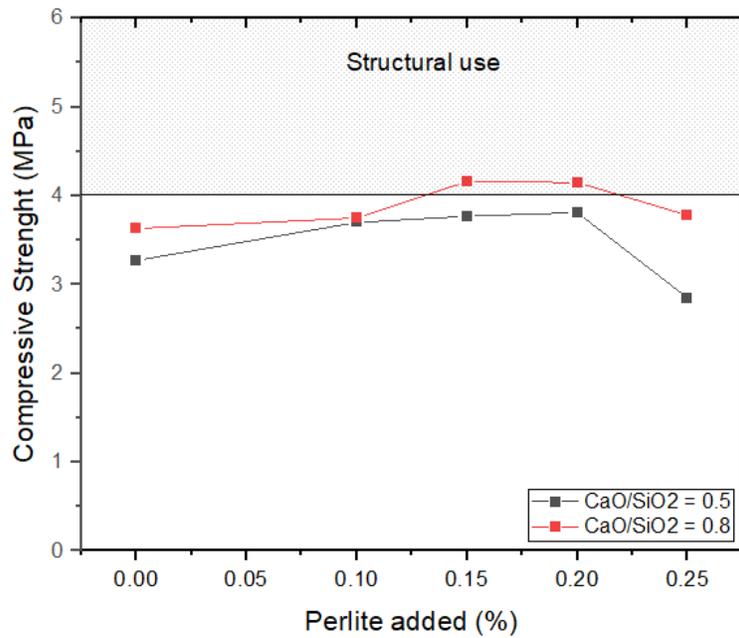


Figura 45 Resultados de resistencia a la compresión en muestras de AAC relacionada con el % de perlita añadido.

De acuerdo con los valores de la Tabla 12 y la Figura 44 anteriores, pudieron resumirse los resultados con las mejores propiedades obtenidas para el AAC se obtuvieron para el aditivo perlita, obteniendo también el más alto contenido de tobermorita 11Å la cual va relacionada íntimamente con la resistencia del material.

4.5 REDUCCIÓN DE AGUA EN LA PRODUCCION DE AAC ADITIVADO CON LIGNOSULFONATO DE SODIO

La reducción del contenido de agua en el diseño de mezclas de concreto tradicional es una estrategia ampliamente utilizada en el ámbito de la construcción para mejorar la calidad del material y optimizar los recursos, pero al día de hoy, se ha mantenido inexplorado en las mezclas de concreto celular autoclaveado.

En esta investigación se abordó también la influencia del aditivo lignosulfonato de sodio como un potencial reductor de agua en el comportamiento de mezclas de concreto celular autoclaveado, evaluando su impacto en la reducción del contenido de agua, sin dejar de lado la trabajabilidad del material.

Por otra parte, es importante mencionar que la incorporación de aditivos siempre plantea interrogantes sobre sus efectos a corto y largo plazo en las propiedades del concreto, particularmente en contextos donde se busca maximizar la sostenibilidad de los procesos constructivos sin afectar la resistencia a la compresión.

Por lo tanto, en esta investigación, se pretendió analizar cómo un aditivo superplastificante (reductor de agua) puede disminuir el contenido de agua en una mezcla de AAC manteniendo sus propiedades de trabajabilidad, utilizando el mismo tipo de metodología.

Los resultados indicaron que el uso del lignosulfonato de sodio permitió una reducción del contenido de agua de hasta un 41.3% siempre y cuando se mantenga una relación de óxidos de 0.5 y un ahorro del 6.8% con una relación de óxidos de 0.8, dependiendo de la dosificación aplicada.

Esta disminución impacta significativamente debido a un ahorro significativo en el consumo de agua durante el proceso sin disminuir de manera excesiva el valor de la resistencia a la compresión.

Asimismo, se observó una notable mejora en la trabajabilidad de las mezclas, permitiendo un manejo más sencillo durante el proceso de colado y una mejor distribución de los elementos, permitiendo tener reacciones más controlada en la etapa de expansión de la mezcla.

Por otro lado, el análisis mostró que el aditivo no genera mayor porosidad, lo que podría mejorar su durabilidad frente a agentes agresivos como sulfatos y cloruros. Esto resalta su potencial no solo como un medio para reducir el uso de agua, sino también para incrementar la vida útil de las estructuras, reduciendo costos de mantenimiento a largo plazo.

No obstante, se identificaron algunas limitaciones en la investigación. Por ejemplo, los ensayos se realizaron bajo condiciones controladas de planta piloto, lo que podría no reflejar completamente las variaciones que ocurren en la obra.

Asimismo, las mezclas evaluadas correspondieron al diseño estándar del AAC, por lo que sería necesario explorar el desempeño del lignosulfonato de sodio en conjunto con la diatomita para poder hallar el porcentaje de ambos aditivos que además de reducir agua, pueda incrementar la resistencia a la compresión.

La Figura 45 muestra el comportamiento del AAC aditivado con el lignosulfonato de sodio en la reducción de agua.



Figura 46 Gráfico comparativo de reducción de agua en el AAC con lignosulfonato de sodio

Como puede observarse en la anterior, la línea azul muestra la relación de óxidos de calcio de 0.5 mientras que la línea anaranjada refleja el porcentaje de ahorro de agua cuando la relación de óxidos es de 0.8.

4.6 ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO DEL AAC

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de datos obtenidos en la presente investigación. Se mostrará de manera general la ventaja que puede obtenerse entre la obtención de un AAC y un AAC aditivado.

A continuación, en la Tabla 13, se detalla el comparativo elaborado entre el AAC y el AAC aditivado con diatomita y lignosulfonato de sodio, que son los aditivos que cubren los dos objetivos principales en esta investigación.

Tabla 13 Comparativo económico de resultados de AAC y AAC aditivado

| Aspecto analizado | Situación actual/hipótesis | Resultados Obtenidos | Comparación con resultados previos |
|---|---|--|---|
| Resistencia mínima conforme a ASTM1386 y EN-772-10-1999 (4MPa) | Sin aditivo: < 4MPa (variable) Con diatomita: Se espera un incremento | Sin aditivo < 4MPa Con diatomita, incremento de 18.25% | Coincide con, (Taban, Schober, Heinz, & Seifert, 2021) la diatomita calcinada ofreció resultados esperados en compresión, sin embargo, la densidad del material tuvo gran incremento. |
| Durabilidad | Se prevé mayor vida útil con aditivo. | Se corrobora la mejora en la estética, calidad y durabilidad del material con aditivo diatomita. | Al momento no se tienen investigaciones previas que se puedan utilizar como comparativo. |
| Consumo de agua en producción (lt/batch) | Sin aditivo: 800 lt/batch Con LS: Se espera una reducción en el consumo de agua de proceso | Sin aditivo: 800 lt/batch Con LS: 745 lt/batch (6.8%) | Refleja una tendencia favorable en sostenibilidad y economía. Al día de hoy no se tiene evidencia de experimentación previa. |
| Costo de materiales por 5.4m³ (batch) | Se espera aumento del costo del AAC con aditivo pero con un mayor beneficio. | Sin aditivo: \$4,262.57(221USD)/batch Con aditivo: \$3,255.0(169USD)/batch | Refleja una tendencia favorable en economía. Al día de hoy no se tiene evidencia de experimentación previa. |

Como puede verse en la Tabla 13, la columna 1 muestra las variables a analizar como fueron AAC formula base, AAC con diatomita y AAC con lignosulfonato de sodio.

Así mismo, se comparan las propiedades del concreto con y sin aditivos. Se observa que el uso del aditivo diatomita, incrementa la resistencia a la compresión, lo que favorece la durabilidad del material.

Se observa también que, aunque el costo inicial del AAC con aditivo es mayor en comparación con un AAC sin adiciones, cuando el producto cumple las especificaciones de diseño, éste incrementa su costo de venta hasta un 4.17 % (de \$72/m³ a \$75/m³, alrededor de 4USD), y de manera adicional, aumenta de resistencia y la mejora en la durabilidad y estética del producto.

Estos factores reducen la cantidad de material no conforme dentro del proceso de producción, disminuye los costos de instalación y mantenimiento, así reparaciones a largo plazo. Esto hace que el uso del aditivo sea económicamente viable y beneficioso para estructuras con altas exigencias de desempeño.

Mientras que, por otra parte, el uso del aditivo lignosulfonato de sodio colmo reductor de agua, hay una mejor relación costo-beneficio debido a que promueve la reducción de agua de proceso sin modificar la trabajabilidad del AAC en su estado verde favoreciendo la durabilidad del material. Estos resultados son consistentes con estudios previos.

- Aunque el costo del concreto con aditivo implica un ligero incremento, los beneficios a largo plazo, como la mayor durabilidad y menor necesidad de mantenimiento, pueden justificar la inversión.

La elección entre concreto con o sin aditivo dependerá de las necesidades específicas del proyecto y del presupuesto disponible. Si se busca una solución más económica a corto plazo, el concreto sin aditivo puede ser adecuado. Sin embargo, para proyectos que requieren mayor durabilidad y eficiencia, el concreto con aditivo podría ser la mejor opción.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se analizan los hallazgos obtenidos en el estudio sobre el impacto de tres aditivos diferentes en las propiedades del concreto celular autoclaveado: lignosulfonato de sodio, diatomita natural y perlita, así como la variación de la relación de óxidos en cada uno de ellos.

Se comparan los resultados con la literatura existente, se interpretan los resultados obtenidos y se discuten sus implicaciones a corto y largo plazo.

Además, se presentan las limitaciones del estudio y se sugieren direcciones para futuras investigaciones.

El objetivo principal fue evaluar la manera en la que los aditivos lignosulfonato de sodio, diatomita y perlita afectan la resistencia a la compresión del concreto celular autoclaveado.

Los resultados mostraron que la adición de lignosulfonato de sodio y diatomita natural, incrementaron la resistencia a la compresión sin comprometer la trabajabilidad del material en estado fresco. Sin embargo, el aditivo perlita disminuyó notablemente la resistencia a la compresión, pero redujo el consumo de agua, lo cual podría ser beneficioso en condiciones climáticas cálidas, ya que la conductividad térmica es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión.

Respecto a la variación de óxidos propuesta en esta investigación, los resultados fueron consistentes y mostraron que, para los tres casos, el aumento de la relación CaO/SiO_2 de 0.5 a 0.8 provocó un incremento en la resistencia a la compresión del material final y una mayor formación del mineral tobermorita 11Å.

Estos resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado que los superplastificantes pueden mejorar la trabajabilidad del concreto (Khatib & Mangat, 2016).

Aunque el comportamiento del concreto celular autoclaveado difiere en su etapa final del concreto tradicional, durante las etapas primarias de formación es crucial mantener la fluidez de la pasta.

Por otra parte, nuestros hallazgos respecto al incremento de resistencia con el uso de aditivo como es el caso de la diatomita natural, coincide con los resultados de (Saridemir & Çelikten, 2020), ya que en su investigación, observaron una mayor resistencia a la compresión (menor densidad y conductividad térmica en los hormigones hechos con agregados de diatomita calcinada).

Sin embargo, los resultados obtenidos contrastan con la investigación de (Degirmenci, 2009) quienes no observaron un aumento significativo en la resistencia a la compresión. Esta discrepancia podría deberse a las diferencias en la formulación específica del concreto celular autoclaveado, basada principalmente en la variación de la relación de óxidos, que es la innovación propuesta.

La trabajabilidad del concreto celular autoclaveado en la etapa de formación con el uso de los aditivos propuestos sugiere que estos son altamente eficaces, ya que no comprometen la reología del material en estado fresco ni alteran las condiciones de curado con vapor. Esto es crucial para el buen funcionamiento del proceso productivo, que requiere un comportamiento dinámico y eficiente.

Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para la industria de la construcción. La mejora de las propiedades mecánicas del concreto celular autoclaveado permite ampliar su gama de aplicaciones estructurales sin incrementar costos ni tiempos de colocación en obra. Teóricamente, este estudio contribuye al entendimiento de cómo diferentes aditivos y la variación de óxidos en la síntesis del concreto celular autoclaveado interactúan con la matriz de concreto, proporcionando datos valiosos para optimizar mezclas según las necesidades específicas de cada proyecto.

Finalmente es importante recalcar de que aunque se trata de una adición al producto original, el ahorro económico conseguido es destacado ya que una mejor resistencia a la compresión permite un mejor precio a la venta del producto.

A pesar de los resultados prometedores, este estudio presenta algunas limitaciones. La investigación se llevó a cabo en condiciones controladas de planta piloto, lo cual no refleja completamente las condiciones de dosificación en una planta de producción regular.

Por otra parte, se utilizó una sola marca para cada tipo de aditivo, lo que puede limitar la generalización de los resultados. El estudio se centró únicamente en la resistencia a la compresión y la trabajabilidad en las etapas de formación del concreto celular autoclaveado, sin considerar otras propiedades importantes como la durabilidad a largo plazo y la resistencia a la corrosión.

Futuras investigaciones deberían considerar la evaluación de aditivos de diferentes fabricantes y formulaciones para verificar la reproducibilidad de los resultados en condiciones de producción en serie con mayores volúmenes. También sería útil realizar estudios en condiciones de producción en serie para validar la aplicabilidad de los hallazgos obtenidos en esta investigación. Adicionalmente, se recomienda investigar el impacto de estos aditivos en otras propiedades del concreto, como la durabilidad y la resistencia a agentes agresivos como condiciones de humedad, alta salinidad y temperaturas extremas, para proporcionar una visión más completa de su desempeño.

5 CONCLUSIONES

El presente estudio se centró en la evaluación del impacto de tres aditivos diatomita, lignosulfonato de sodio y perlita en las propiedades mecánicas del concreto celular autoclaveado.

Para la evaluación de los 3 aditivos mencionados, se realizaron 3 propuestas de relación de óxidos CaO/SiO₂ de 0.5, 0.8 y 1.0 con la finalidad de incrementar la formación de la tobermorita 11Å.

Los resultados obtenidos nos permiten extraer las siguientes conclusiones clave:

5.1 Impacto en la Resistencia a la Compresión

La adición del superplastificante lignosulfonato de sodio en el AAC en las mezclas resultó en un incremento de la resistencia a la compresión, alcanzando valores hasta un 22% mayor en comparación con el AAC sin aditivo.

Sin embargo, para este caso en particular sería necesario mantener una adición de 0.25% de diatomita y una relación de óxidos de 0.8, lo que incrementaría el costo de producción del AAC.

Este aumento puede atribuirse a la mejor dispersión de las partículas cementicias y la reducción del contenido de agua sin comprometer la trabajabilidad en su etapa inicial, pero no es viable en lo que respecta al beneficio económico del producto.

Por otra parte, la adición de la diatomita en el AAC resultó también en un mayor incremento de la resistencia a la compresión, alcanzando valores hasta un 18.25% mayor para una adición de 0.20% de diatomita con una relación de óxidos de 0.8.

De igual forma, para el caso específico de este aditivo, se logró también la disminución de la densidad del producto, lo cual impacta directamente en sus propiedades aislantes y la adición de diatomita, al ser menor, tiene menor impacto en el aspecto económico.

Finalmente, la adición de la perlita natural en el AAC resultó en una disminución importante de la resistencia a la compresión no solamente en comparación con los demás aditivos, sino también en comparación con el AAC sin aditivar.

En lo que respecta a este aditivo, podría utilizarse si el objetivo se basara en la disminución de conductividad térmica del producto pero no estaría enfocado a una aplicación estructural.

En el caso de los dos primeros aditivos, el incremento de la relación de óxidos impactó de manera positiva en la resistencia a la compresión del AAC sin comprometer la densidad de diseño del material.

Cabe mencionar que al ser el aditivo diatomita el que ofreció valores superiores de resistencia a la compresión, se decidió ejecutar la fase 3 antes mencionada con la finalidad de conocer el impacto que tendría el aumento de la relación óxidos a un valor de 1.

En el caso de la perlita, aún con el incremento en la relación de óxidos, la resistencia a la compresión del AAC no se incrementó. Por el contrario, para ambas relaciones, la mejora del material se enfocó en la propiedad de la conductividad térmica para futuros trabajos de investigación.

Microestructura Densa y Homogénea

Los análisis microestructurales mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) revelaron que:

En el caso del AAC aditivado con el lignosulfonato de sodio, se mostró una matriz cementicia homogénea en las muestras de concreto aditivado. La presencia de este aditivo facilitó la hidratación del cemento, generando la homogenización de los poros, contribuyendo a la estructura del material.

En el caso del AAC aditivado con diatomita natural, se mostró una matriz cementicia más ligera y homogénea en las muestras de concreto aditivado. La presencia de este aditivo incrementó la integridad estructural del material. Esto se vio reflejado en el significativo

aumento de la resistencia a la compresión del material puesto que ese obtuvo un incremento en la formación de la tobermorita 11Å.

En el caso del AAC aditivado con perlita, se mostró la matriz cementicia más ligera de todos los experimentos. La presencia de este aditivo facilitó la absorción de agua durante el proceso inicial de síntesis, sin embargo, no fue de utilidad en lo que se refiere al incremento de la resistencia a la compresión debido a ligereza.

Impacto de la Dosificación de Aditivos

La investigación demostró que la dosificación de aditivos como lignosulfonato de sodio y diatomita, juegan un papel crucial en los resultados obtenidos. Hallar la dosis óptima de aditivo, llevó a mejoras significativas en las propiedades mecánicas, mientras que el uso de aditivos aligerados de alta captación de agua como la perlita, resultó en efectos adversos, como la reducción de la resistencia a la compresión, pero en un aumento del coeficiente de conductividad térmica.

Comparación con Estudios Previos

Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos en la literatura, confirmando que los aditivos alteran las propiedades del concreto celular autoclaveado al igual que sucede con el concreto tradicional.

Sin embargo, nuestro estudio exploró adiciones no realizadas anteriormente y se obtuvo un mayor incremento en la resistencia, lo cual puede estar relacionado con las combinaciones de aditivos utilizadas.

Implicaciones Prácticas

Las mejoras observadas en las propiedades del AAC aditivado tienen importantes implicaciones prácticas. La industria de la construcción puede beneficiarse de la utilización de aditivos para producir un concreto celular autoclaveado de alto rendimiento, especialmente en aplicaciones donde la durabilidad y la resistencia son críticas.

Limitaciones del Estudio

A pesar de los hallazgos positivos en la presente investigación, el estudio presentó durante su desarrollo algunas limitaciones como son, la variabilidad en las calidades de las materias primas utilizadas, variabilidad en las condiciones de curado y la escala de los experimentos ya que, para poder replicar los resultados obtenidos, es necesario hacer la prueba en planta tomando como base los experimentos realizados a nivel laboratorio. Además, para detallar los efectos a largo plazo de los 3 aditivos presentados, pero en condiciones reales de servicio requieren una investigación adicional y profunda.

En Resumen

Esta investigación confirma que la presencia de algunos aditivos como lo son el lignosulfonato de sodio y la diatomita natural en la síntesis del AAC mejora significativamente algunas de las propiedades mecánicas, lo cual impacta directamente en la durabilidad del material y amplía la posibilidad de aplicación en diversos sectores del campo de la construcción.

Estos hallazgos tienen importantes aplicaciones prácticas y contribuyen al avance del conocimiento dentro del poco explorado campo del concreto celular autoclaveado en nuestro país.

Continuar investigando y optimizando el uso de diversos aditivos, permitirá el desarrollo de un concreto celular autoclaveado más eficiente y duradero, beneficiando a la industria de la construcción y contribuyendo a la sostenibilidad de las infraestructuras.

Con respecto a la reducción del agua de proceso, el estudio concluye que el aditivo reductor de agua es una herramienta eficaz para optimizar el diseño de mezclas de concreto, permitiendo una reducción significativa en el contenido de agua sin comprometer la calidad del material. Este enfoque no solo tiene beneficios técnicos, sino también económicos y ambientales, ya que disminuye el uso de recursos hídricos y contribuye a prácticas constructivas más sostenibles.

En síntesis, esta evidencia de que los diferentes aditivos, representan una alternativa viable e innovadora para mejorar las propiedades del concreto y en la reducción del impacto ambiental de la construcción. La implementación de este tipo de soluciones en el ámbito industrial puede ser un paso clave hacia una construcción más eficiente y sostenible.

7. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Posterior a esta investigación, se recomienda llevar a cabo los estudios adicionales para explorar el impacto de diferentes combinaciones de los aditivos propuestos, o de otros aditivos, con el objetivo de ampliar las propiedades del concreto celular autoclaveado (AAC) y potenciar sus atributos.

Estos estudios podrían incluir variaciones en las proporciones de los aditivos y la incorporación de nuevos compuestos químicos para evaluar sus efectos sobre propiedades como la durabilidad, aislamiento térmico, acústico y resistencia medioambiental.

Además, sería beneficioso realizar investigaciones a largo plazo para evaluar el comportamiento del AAC aditivado bajo condiciones de carga cíclica y en ambientes agresivos extremos, tales como alta salinidad, alta humedad y temperaturas extremas.

Este tipo de estudios son cruciales para determinar la viabilidad del AAC en diversas aplicaciones estructurales y en los diferentes entornos geográficos de nuestro país.

Otra recomendación importante es la ejecución de una síntesis a nivel industrial. Este paso permitiría ajustar la formulación del producto en condiciones de producción real y a gran escala, facilitando su implementación directa en la producción regular del AAC.

Evaluar el desempeño del AAC aditivado en una planta de producción estándar es esencial para garantizar que los beneficios observados en estudios controlados se traduzcan efectivamente en un entorno industrial.

Además, realizar pruebas piloto en plantas de producción, lo cual permitiría obtener datos valiosos sobre la aplicabilidad práctica y económica del AAC aditivado, proporcionando una evaluación más completa y realista de su rendimiento y beneficios potenciales.

Finalmente, se recomienda realizar investigaciones futuras para evaluar el comportamiento del aditivo en diferentes contextos, incluyendo condiciones ambientales extremas y mezclas con agregados reciclados. Además, sería relevante analizar su impacto en otras propiedades, como la resistencia a la fisuración o el comportamiento térmico del concreto.

(Standards), A. (1958). *American Society for Testing Material*. Philadelphia.

Agua, C. N. (17 de 09 de 2020). *CONAGUA*. Obtenido de CONAGUA:

<https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/hidalgo/hidalgo.html>

Aguado, D. C. (1988). Aproximación al concreto poroso. *Revista Carreteras* 21, 2-8.

Alicante, U. d. (12 de 12 de 2018). *ssttia*. Obtenido de ssttia:

https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x_contactar.html

Amit Raj, A., Chandra Borsaikia, A., & Shanker Dixit, U. (2018). *Manufacturing of Autoclaved Aerated Concrete (AAC): Present Status and Future Trends*. India: Springer.

ANFAH. (18 de 02 de 2005). *IECA*. Obtenido de IECA:

<https://fdocuments.ec/document/jornada-ieca-18-de-mayo-de-2005-sevilla-anfah-aditivos-polifuncionales.html>

ASOCEM. (04 de 09 de 2015). *www.asocem.org*. Obtenido de www.asocem.org:

<http://www.asocem.org.pe/productos-b/la-sostenibilidad-de-concreto-como-beneficio-para-la-sociedad>

Association, G. C. (01 de 10 de 2021). *gccassociation.org*. Obtenido de

[gccassociation.org: https://gccassociation.org/concretetfuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Overview-Spanish.pdf](https://gccassociation.org/concretetfuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Overview-Spanish.pdf)

- ASTM. (16 de junio de 1898). *www.webstore.ansi.org*. Obtenido de [www.webstore.ansi.org: https://webstore.ansi.org/SDO/ASTM?gclid=Cj0KCQjwhY-aBhCUARIsALNIC05EfDYFHKBfVKJqF1dKqthV_eUOjhaidxWj0ZGVh_Seyg46MHmgsF8aAih7EALw_wcB](https://webstore.ansi.org/SDO/ASTM?gclid=Cj0KCQjwhY-aBhCUARIsALNIC05EfDYFHKBfVKJqF1dKqthV_eUOjhaidxWj0ZGVh_Seyg46MHmgsF8aAih7EALw_wcB)
- Barshan-tashnizi, M., Ahmadian, S., & Niknam, K. (2008). Covalent immobilization of *Drosophila* acetylcholinesterase for biosensor applications. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 257-264.
- Baspinar, S., Demir, I., & Kahraman, E. &. (2013). Utilization potential of fly ash together with silica fume in autoclaved aerated concrete production. *Environmental Engineering*, 47-52.
- Borgel, I., & Hernández, J. &. (2007). Caracterización del yacimiento de diatomita de Loma Largo, Municipio de Acatlán, Hgo. y evaluación de sus aplicaciones. *Tesis*, 1-52.
- Breilly, D., Fadlallah, S., Froidevaux, V., & Colas, A. &. (2021). Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete. *Construction and Building Materials*, 1-3.
- Byung-Wan, J., Sumit, C., Ki Heon, K., & Yungung, L. (2014). Effectiveness of the Top-Down Nanotechnology in the Production of Ultrafine Cement (~220 nm). *Journal of Nanomaterials*, 1-4.
- Cabrilla, R., Fiorio, B., Beaucour, A.-I., Dumontet, H., & Ortola, S. (2006). Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. *Construction and Building Materials*, 286-295.
- Casati, R. &. (2014). Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles. *Journal of Metals*, 65-83.

- Cervantes Abarca, A. (2008). Nuevas Tecnologías en Concretos - Concreto Celular. *UAM-AZC*, 1-24.
- Chen, Y., Chang, J., & Lai, Y. &. (2017). A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions. *Construction and Building Materials*, 622-629.
- Co., C. &. (01 de 01 de 2018). *www.chemicalandconstruction.com*. Obtenido de *www.chemicalandconstruction.com*: <https://docplayer.es/78273055-Lignosulfonato-de-sodio.html>
- Construcción, C. M. (01 de 01 de 2019). *cmic.org.mx*. Obtenido de *cmic.org.mx*: <https://www.cmic.org.mx/cmic/ceesco/2018/RANKING%20MUNDIAL%20DE%20COMPETITIVIDAD%204.0%20EN%20INFRAESTRUCTURA%202018-2019.pdf>
- Consulting, I. I. (01 de 01 de 23). *Infinitia Research*. Obtenido de Infinitia Research: https://www.infinitiaresearch.com/noticias/tga-que-es-el-analisis-termogravimetrico/#que_es_el_analisis_termogravimetrico
- Crouch, L., Pitt, J., & Hewitt, R. (2007). Pervious Portland Cement concrete static modulus of elasticity. *Journal of Materials. Civil Engineering*, 561-569.
- Cruz-Palafox. (2018). Diseño de un concreto permeable para la recuperación de agua.
- CSIC. (2003). *Prácticas Análisis Térmico por DSC*. Madrid: CSIC.
- De la Cruz Costa, F. J. (2015). Concreto ligero utilizando cáscara de nuez. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 2-3.
- Definicion.DE. (01 de 01 de 2018). *Definicion.DE*. Obtenido de Definicion.DE : <https://definicion.de/sintesis/>
- Degirmenci, N. &. (2009). Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 284-288.

- Deloya Cobián, G. (27 de Diciembre de 2021). 2022, el año del reto tecnológico. *El Economista*, págs. 1-2.
- Diez, M., Gaitero, J., & Dolado, J. &. (2017). Síntesis hidrotermal supercrítica ultrarrápida de tobermorita en condiciones termodinámicamente metaestables. *A Journal of German Chemical Society*, 3162.
- Diez-Garcia, M., Juan, G., Dolado, J. S., & Aymonier, C. (2017). Ultra-Fast Supercritical Hydrothermal Synthesis of Tobermorite under Thermodynamically Metastable Conditions. *Angewandte Chemie*, 3162.
- Duque Escobar, G. (17 de 09 de 2019). *Geotechnical Consulting*. Obtenido de Geotechnical Consulting: <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/granulometria/>
- Elizondo Fócil, A. (01 de 02 de 2006). Caracterización del concreto celular elaborado con espuma preformada. *Caracterización del concreto celular elaborado con espuma preformada*. Nuevo León, Monterrey, México.
- F.M., H., S., V., & Montes, F. (2006). Permeability predictions for sand-clogged portland cement previous concrete pavement system. *Environmental Managment*, 42-49.
- Fernández, M. (04 de 03 de 2020). *Universidad de Burgos*. Obtenido de Universidad de Burgos: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb>
- Fernández-Ruiz, R. (01 de 07 de 2004). *El plasma de Ar. Un poco de historia*. Obtenido de El plasma de Ar. Un poco de historia: <http://ramontxrf.260mb.net/icpms.html>
- Flores, E., López, I., Velázquez, D., & Moreno, E. &. (2020). Comparativa del impacto de la diatomita, perlita y zeolita en el comportamiento. *Pädi. Boletín científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 5-13.
- Galván, M. &. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 93-102.

García Martínez, R. (16 de 10 de 2016). *20minutos*. Obtenido de 20minutos:

<https://www.20minutos.com.mx/noticia/147228/0/ladrilleras-artesanales-fuente-de-empleo-y-contaminacion/>

Gencel, O., Bayraktar, O., Kaplan, G., Arslan, O., Nodehi, M., Benli, A., & Gholampour, A. &. (2022). Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties. *Construction and Building Materials*, 1-9.

Gerardi, J. (23 de 03 de 2022). *Proest.com*. Obtenido de Proest.com:

<https://proest.com/es/construccion/consejos/innovative-materials/>

Ghasem, P. y. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Journal of Building Engineering*, 1-5.

Giraldo, M. &. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Scielo*, 1-9.

Giraldo, M. &. (2006). Mineralogical evolution of portland cement during hydration process. *Scielo*, 1-9.

Gómez, L. &. (2016). Modificación de las propiedades de matrices cementantes mediante la adición de partículas. *ALCONAPAT*, 101-115.

González, Z. (30 de 04 de 2015). Habilidad y política de vivienda en México. *Habilidad y política de vivienda en México*. Ciudad de México, Coyoacán, México: UNAM.

Granados, C. &. (01 de 01 de 2015). Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de mezclas asfálticas. *Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de mezclas asfálticas*. Bogotá, Bogotá, Colombia: repository.

Hauser, A., & Eggenberger, U. &. (1999). Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, 297-302.

Hernández-Ávila, J., Salinas-Rodríguez, E., Cerecedo-Sáenz, E., Reyes-Valderrama, M., Arenas-Flores, A., & Román-Gutiérrez, A. &.-L. (2017). Diatomeas y su capacidad de remoción de metales pesados por intercambio catiónico. *Metals*, 1-9.

Huerta, R. (09 de 07 de 2009). *IMCYC*. Obtenido de IMCYC:
<http://www.imcyc.com/ct2009/jul09/tecnologia.htm>

IMCYC. (18 de Marzo de 2019). *Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto*. Obtenido de Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto: <http://www.imcyc.com/concreto/>

Industries, K. (01 de 01 de 2020). *www.kemindustries.com*. Obtenido de www.kemindustries.com: <https://kemindustries.com/lignosulfonato-de-sodio/#:~:text=LIGNOSULFONATOS%20COMO%20ADITIVOS%20DE%20CONCRETOS&text=Por%20lo%20general%20se%20utilizan,masa%2C%20mejorando%20las%20propiedades%20reol%C3%B3gicas>.

Infraestructura, D. d. (01 de octubre de 2004). *www.cepal.org*. Obtenido de www.cepal.org: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6441-desarrollo-infraestructura-crecimiento-economico-revision-conceptual>

Infraestructura, N. C. (01 de octubre de 2004). *www.cepal.org*. Obtenido de www.cepal.org: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6441-desarrollo-infraestructura-crecimiento-economico-revision-conceptual>

Innovation, A. (09 de 03 de 2023). *ATRIA Innovation*. Obtenido de ATRIA Innovation: https://www.atriainnovation.com/caracterizacion-de-materiales-tecnicas/#Importancia_de_la_caracterizacion_de_materiales

- Izquierdo, M. y. (2022). *Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones*. Lima.
- Jiang, J., Lu, X., Niu, T., Hu, Y., Wu, J., Cui, W., & Zhao, D. &. (2022). Performance optimization and hydration characteristics of BOF slag-based autoclaved aerated concrete (AAC). *Cement and Concrete Composites*, 1-14.
- Jun, B., Kyungsun, S., & Sangwon, P. &. (2015). Effects of CO₂ Bubble Size, CO₂ Flow Rate and Calcium Source on the Size and Specific Surface Area of CaCO₃ Particles. *Energies Research Gate*, 1-11.
- Kadasevich, I., Schneider, H., & Stoyan, D. (2005). Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete. *Cement and concrete Research*, 1495-1502.
- Kalpana, M. y. (2019). Study on autoclaved aerated concrete. *ScienceDirect*, 894-896.
- Kamal, M. A. (2020). Analysis of autoclaved aerated concrete (AAC) blocks with reference to its potential and sustainability. *Journal of Building Materials and Structures*, 1-11.
- Khatib, J., & Mangat, P. &. (2016). Mechanical and physical properties of concrete containing FGD waste. *Magazine of Concrete Research*, 550-560.
- Kudiakov, A., & Prischeva, I. &. (2015). Foam concrete with porous mineral and organic additives. *Materials Science and Engineering*, 1-5.
- Kujawa, V., & Olewnik-Kruszkowska, E. &. (2021). Concrete Strengthening by introducing polymer based additives into the cement matrix. *Materials*, 200-222.
- Kunchariyakun, K., & Asavapisit, S. &. (2015). Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate. *Cement and Concrete composites*, 11-16.

- Kurama, H., & Topçu, I. &. (2009). Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *Journal of Materials Processing Technology*, 767-773.
- Library, S. P. (01 de 01 de 2018). *www.alamy.es*. Obtenido de *www.alamy.es*:
<https://www.alamy.es/foto-cristales-de-cuarzo-color-micrografia-analisis-de-electrones-sem-esta-es-una-forma-de-minerales-de-silicato-de-silice-dioxido-de-silicio-89624211.html>
- Lozada, S. A. (2018). Evolución de los sistemas estructurales y constructivos para edificaciones de altura en la Ciudad de México . *[Tesis de Doctorado, UNAM] Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura*.
- Ma, Z., Jiang, L., & Liao, H. &. (2022). Research on the methods for improving the compressive strength of solid waste-based high-strength autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 1-9.
- Matsui, K. K. (2011). In-situ time-resolved X-ray diffraction of tobermorite formation in autoclaved aerated concrete: influence of silica source reactivity and Al addition. *Cement and Concrete Research*, 510-519.
- México, C. S. (10 de 03 de 2020). *www.concretosolido.mx*. Obtenido de *www.concretosolido.mx*: <https://www.concretosolido.mx/la-importancia-del-concreto-en-los-proyectos-de-construccion/>
- México, G. d. (01 de 01 de 2022). *Fabricación de Cemento y Productos de Concreto*. Obtenido de *Fabricación de Cemento y Productos de Concreto*:
<https://datamexico.org/es/profile/industry/cement-and-concrete-product-manufacturing>
- Michelini, E., Ferretti, D., & Miccoli, L. &. (2023). Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments. *Construction and Building Materials*, 26-32.

- Michelini, E., Ferretti, D., & Miccoli, L. &. (2023). Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments. *Construction and Building Materials*, 1-9.
- Minero, S. d. (01 de 01 de 2013). *www.economia.gob.mx*. Obtenido de *www.economia.gob.mx*:
https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_diatomita_1013.pdf
- Mitsuda, T., & Sasaki, K. &. (1992). Phase Evolution during Autoclaving Process of Aerated Concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 1858-1863.
- Mollah, M., Yu, W., & Schennach, R. &. (2000). A Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate. *Cement and Concrete Research*, 267-273.
- Muñoz Morales, L. y. (2016). Caracterización de las propiedades mecánicas de un ladrillo no estructural de tierra como soporte de material vegetal en muros verdes. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 1-4.
- Mustafa, A. A. (2007). Influence of Zeolita additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Mineral Research and Exploration General Directorate*.
- Narayanan, N. &. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 321-329.
- Narayanan, N. R. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 321-329.
- Niño, H. J. (2010). *Materiales, propiedades y diseño de mezclas*. ASOCRETO.
- Norifumi, I., Hideki, I., & Takeshi, M. (1995). Influence of quartz particle size on the chemical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (I) tobermorite formation. *Cement and Concrete Research*, 243-248.

- O'Reilly Díaz, V. B. (2010). Las tecnologías del concreto en su ciclo de vida. *Scielo*, 2-10.
- Pawel Walczak, J. M. (2015). Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete. *Science Direct*, 302-309.
- Payán, O. (25 de 04 de 2018). *El blog de Olga Payán*. Obtenido de Difracción de Rayos-X. Análisis de difractogramas:
<http://assessmentandpreservation.blogspot.com/2018/04/difraccion-de-rayos-x-analisis-de.html>
- Peng, Y., Liu, Y., & Zhana, B. &. (2021). Preparation of autoclaved aerated concrete by using graphite tailings as an alternative silica source. *Construction and Building Materials*, 1-9.
- Pinto, M. C. (2019). Estudio experimental del concreto poroso con la incorporación de distintas granulometrías. *Revista de I+D Tecnológico*, 2-14.
- Poo R., A. (2003). El sector de la construcción en México. En A. Poo R., *Administración para el diseño* (pág. 21). Ciudad de México: CYAD.
- RAE. (s.f.). *Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española*.
- Ramírez, J. (2007). Comportamiento de muros de concreto celular con diferentes cuantías de acero de refuerzo. *Comportamiento de muros de concreto celular con diferentes cuantías de acero de refuerzo*. Ciudad de México, México D.F., México.
- Razak, H., Abutaha, F., & Ibrahim, H. (2017). Strength and abrasion resistance of palm oil clinker previous concrete under different curing method. *Building Materials*, 576-587.
- Ren Di, W., Shao Bin, D., Shou, W., Jun Huang, Y., Li, B. D., & Nurmirezayev, A. (2020). Utilization of the circulating fluidized bed combustion ash in autoclaved aerated concrete: Effect of superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 2-8.

- RenDiWu, S. S. (2020). Utilization of the circulating fluidized bed combustion ash in autoclaved aerated concrete: Effect of superplasticizer. *ELSEVIER*, 2-8.
- Rengifo Cuenca, M. C. (Octubre de 2013). Estudio del hormigón celular. *Estudio del hormigón celular*. Quito, Quito, Perú.
- Renman, G., & Renman, A. (2012). Sustainable use of crushed autoclaved aerated concrete. *8th International conference on sustainable management of waste and recycled materials in construction* (págs. 1-7). Gothenburg, Sweden: ISCOWA and SGI.
- Rodríguez, S. (04 de 05 de 2008). *Match 3. Phase Identification from Powder Diffraction*.
Obtenido de Tutorial:
https://www.crystalimpact.com/download/match/Tutorial_Espanol.pdf
- Rózycka, A. &. (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 65-71.
- Rózycka, A., & Pichor, W. (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 65-71.
- Saiyed, F., Makwana, A., Pitroda, J., & Vyas, C. (2014). AERATED AUTOCLAVED CONCRETE (AAC) BLOCKS: Novel material for Construction Industry. *International Journal of Advanced Research of Engineering, Science & Management*, 1-12.
- Sarıdemir, M., & Çelikten, S. &. (2020). Mechanical and microstructural properties of calcined diatomite powder modified high strength mortars at ambient and high temperatures. *Advanced Powder Technology*, 3004-3017.
- Schober, G. (2011). Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC). A review on pore structure, types of porosity, measurements methods and effects of porosity on

- properties. *Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC)*, (págs. 351-359). Bydgoszcz, Polonia.
- Serralde-Lealba, J. R.-Á.-S.-I.-R.-H. (2021). Caracterización de la materia prima para la elaboración de un material de construcción, utilizando diatomita y Residuos de Construcción y Demolición (RCD). *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9, 213-221.
- Shan, C., Yang, Z., Su, Z., Rajan, R., & Zhou, X. &. (2022). Preparation and characterization of waterproof autoclaved aerated concrete using molybdenum tailings as the raw materials. *J. Build. Eng.*, 1-9.
- Sharma, N., & Sharma, P. &. (2020). Influence of Diatomite on the properties of mortar and concrete: A Review. *Materials Science and Engineering*, 1-9.
- Shaw S, C. S. (2000). La formación hidrotermal del silicato de calcio. *Geología Química*, 129-140.
- Shweta O. Rathi, P. K. (2015). AAC-Block A new Eco-Friendly Material of Construction. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 410-414.
- Singh, M. &. (1991). Perlite-based building materials — a review of current applications. *Construction and Building Materials*, 75-81.
- Sinica, M. S. (2014). Impact of complex additive consisting of continuous basalt fibres and SiO₂ microdust on strength and heat resistance properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and buildings materials*, 718-726.
- Structuralia. (23 de 05 de 2022). *Structuralia/Ingeniería Civil y Transporte*. Obtenido de Structuralia/Ingeniería Civil y Transporte:
<https://blog.structuralia.com/hormig%C3%B3n-aligerado-propiedades>

- Suresh, A., Harsha, A., & Ghosh, M. (2009). Solid particle erosion of unidirectional fibre reinforced thermoplastic composites. *Journal of Research Gate*, 1516-1524.
- Suryanaraya C., G. N. (s.f.). *X-Ray Diffraction A Practical Approach*. Washington: Plenum Press.
- Suryanarayana C. & Grant, M. (1998). *X-Ray Diffraction. A Practical Approach*. New York: Plenum Press.
- Taban, S., Schober, G., Heinz, D., & Seifert, S. (2021). Production of autoclaved aerated concrete with silica raw materials of a higher solubility than quartz part II: Influence of autoclaving temperature. *Construction and Building Materials*, 287.
- Tang, G. (2002). Experimental Study of Heavy Oil Production from Diatomite by Water Imbibition at Elevated Temperatures. *Improved Oil Recovery Symposium*, 1-8.
- Tennis, P., M.L., L., & Akers, D. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. Skokie Illinois: PCP.
- Topçu, I. &. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 1486-1491.
- Triviño Vázquez, F. y. (1964). La preparación de las muestras para análisis por Rayos-X. En S. M. Triviño Vázquez F., *La preparación de las muestras para análisis por Rayos-X* (págs. 617-689). España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Turski, R., Kreft, O., & Fudge, C. &. (2023). EAACA net zero roadmap for autoclaved aerated concrete. *WILEY On Library*, 19-24.
- Van Boggelen, W. (abril de 2014). *History of Autoclaved Aerated Concrete*. Obtenido de AAC-Worldwide: <https://www.aac-worldwide.com/category/news/history-of-autoclaved-aerated-concrete-815>

- Van Boggelen, W. (04 de 2014). <https://www.aircrete.com/es/about-aac/>. Obtenido de <https://www.aircrete.com/es/about-aac/>: <https://www.aircrete.com/wp-content/uploads/2018/07/W.M.-van-Boggelen-History-of-Autoclaved-Aerated-Concrete.pdf>
- Vargas, Y. O.-V. (2013). Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores. *Revista Digital Universitaria*, 1-4.
- Vargas, Y., Eduardo, A., Valdivia, O., Rodríguez, G. I., Gómez-Vidales, V., Carvayar, J. A., & Bórquez, A. G. (2013). Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores. *Revista Digital Universitaria*, 1-5.
- Vidaud Quintana, J. (2014). Breve reseña - Los aditivos químicos y su impacto en el medio ambiente. *Construcción y tecnología en concreto*, 1-4.
- Vijay, R., Senthil, R., Siva, A., Chockkalingam, U., Mugahed, A., Pablo, G., & Fediuk, R. &. (2022). Performance Investigation of the Incorporation of Ground Granulated Blast Furnace Slag with Fly Ash in Autoclaved Aerated Concrete. *Crystals*, 1-8.
- Walczak, P., Małolepszy, J., Reben, M., & Szymański, P. &. (2015). Utilization of Waste Glass in Autoclaved Aerated Concrete. *Procedia Engineering*, 302-309.
- Walczak, P., Malolepszy, J., Reben, M., & Szymansky, P. &. (2015). Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete. *Science Direct*, 302-309.
- Wang, X., Li, T., Xie, W., Zhang, L., & Li, D. &. (2024). Molecular dynamics study on the structure and mechanical properties of tobermorite. *Materials Science and Engineering: B*, 1-9.
- Watson, K. (1980). Autoclaved aerated concrete from slate waste Part 2: Some property/porosity relationships. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 121-123.
- Wittmann, F. H. (1992). *Advances in autoclaved aerated concrete*. Switzerland: AAB.

- Xiaoling-Qu, X. Z. (2017). Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete . *ELSEVIER*, 505-516.
- Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., & Huang, J. (2018). Investigation of properties of porous concrete as road base material. *Building Materials*, 141-148.
- Yang, J., & G., J. (2003). Experimental study of properties of porous concrete pavement materials. *Cement and concrete Research*, 381-386.
- Yang, Y., Zhang, J., Huang, F., Chen, Z., & Qiu, R. &. (2024). Effect of structural parameters on compression performance of autoclaved aerated concrete: Simulation and machine learning. *Construction and Building Materials*, 1-9.
- Ye, H., Zhu, B., Pan, J., & Chen, X. &. (2024). Solid waste-based low-carbon autoclaved aerated concrete: Relationship between engineering properties and microstructure. *Journal of Building Engineering*, 1-9.
- Zhu, L., Zhang, X., & Pan, X. (2011). P. Fatehi, Y. Ni in Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Fibers from Forest Biomass. *American Chemical Society, Washington*, 409–441.
- Zubieta, C. (2010). Métodos de caracterización. En C. Zubieta, *Métodos de caracterización* (pág. 12).