

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO
EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES
DE LA EDIFICACIÓN.**

Por

RICARDO VALDEZ CANO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN.**

Agosto, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO

EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES

DE LA EDIFICACIÓN.

Por

RICARDO VALDEZ CANO

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

DIRECTOR DE TESIS: DR. JAVIER RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ

CODIRECTOR DE TESIS: DR. MIGUEL ÁNGEL GUERRA COSSÍO

Agosto, 2023



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2023/JULIO/31

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-


Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es "AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN", que presenta el M.Arq. RICARDO VALDEZ CANO, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,


DR. JAVIER ROBRISO GONZÁLEZ LÓPEZ

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.66455
Tels. (81) 14424430 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: apl.fc@uanl.mx



"El saber de sus hijos
hacia su grandeza."

UNIVERSIDAD DE SONORA

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y MINAS

Hermosillo, Sonora

tel. (662) 2592183 y 2592184

26 de Julio de 2023

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es "**AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN**", que presenta el **M. Arq. RICARDO VALDEZ CANO**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento cuenta con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea aprobado.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Arturo Ojeda de la Cruz

Evaluador



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FECHA: 2023/08/01

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es "**AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN**", que presenta el **M. Arq. RICARDO VALDEZ CANO**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

DR. MIGUEL ÁNGEL GUERRA COSSÍO

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels. 8329-4000 ext. 7216, 7234
www.ingenieriacivil.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **"AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN"**, que presenta el M. Arq. RICARDO VALDEZ CANO, como requisito parcial para obtener el grado de DOCTOR EN INGENIERÍA, del programa DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento CUENTA con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea APROBADO.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dra. Mayra Zyzilia Figueras Torres
Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx

2023/08/04

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE. -


Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es " **AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN**", que presenta el **M. Arq. RICARDO VALDEZ CANO**, como requisito parcial para obtener el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA**, del programa **DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Jorge Braulio Cosío Durán
Evaluador





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE RICARDO VALDEZ CANO

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:
AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE
MODIFICADO EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA
ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN

RECOMENDACIONES ADICIONALES:
REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN
EN LA TESIS IMPRESA

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo



Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación
Ciudad Universitaria, 22 de Julio de 2023



Av. Universidad 571 Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66456
Tels: (81) 1402480 ext. 4448 | 83294500 ext. 7218, 7234
correo.electronico@uaqn.unl.mx

Código: FOR-SPi-14; Revisión: 01; Página 1 de 1

**AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO
EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES
DE LA EDIFICACIÓN.**

Aprobación de la Tesis:

Dr. Javier Rodrigo González López

Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres

Dr. Arturo Ojeda de la Cruz

Dr. Jorge Braulio Cossío Durán

Subdirector de Estudios de Postgrado
Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas que me apoyaron en este proyecto; dentro de la Universidad Autónoma de Coahuila, al señor Rector Ingeniero Jesús Salvador Hernández Vélez, por alentar y apoyar mis estudios en el Doctorado; al Doctor Luis Gutiérrez Flores, Director de Planeación, por mostrarme y llevarme al camino de la investigación; a los dos directores de la Facultad de Ingeniería Civil, Unidad Torreón, al Doctor José Ángel Delgado Trujillo y actualmente al Maestro en Ingeniería Arturo Rosales Quintana, por permitirme ausentarme y asignarme un lugar en su Unidad Académica a donde pronto me integraré como investigador.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por continuar apoyando la formación especializada de investigadores en México, beneficiándome con la beca 2019-000037-02NACF-05306 para el financiamiento de este proyecto; A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Subdirección de Posgrado y a los diversos laboratorios que integran al Instituto de Ingeniería Civil, les reconozco y agradezco transmitirme sus conocimientos, darme su apoyo académico y todos los recursos técnicos que se me han brindado.

En especial, agradezco al Doctor Javier Rodrigo González López, por su dirección, por mostrarme sus experiencias, darme sus recomendaciones y observaciones, siempre certeras, precisas, que me permitieron formar y llevar a cabo esta investigación. Valoro tus atenciones a mi persona y externo mi admiración por tu trabajo.

A todos ustedes, gracias.....

DEDICATORIA.

Para conseguir ser Doctor en Ingeniería, he invertido tiempo, perdiendo cosas, momentos y logros importantes de mi familia; he tenido que experimentar encierro y aislamiento sin su compañía y ustedes jamás han puesto en duda el amor que les tengo **Ariana Sofía, Ximena y Ricardo.**

Les agradezco todo su esfuerzo, pues ustedes también han perdido mi compañía en este tiempo, han entendido la dedicación que he puesto a mi trabajo y es por esa razón que lo voy logrando satisfactoriamente; Gracias por quererme aun así y pronto se los recompensaré.

A mi esposa **Ariana**, por alentarme, por su apoyo y comprensión. Sabes que este logro es compartido, y siempre agradezco tu amor y compañía;**Pero te amo.**

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Planteamiento del Problema.....	4
1.2.- Justificación del proyecto.....	16
1.3.- Hipótesis	18
1.4.- Objetivo General	18
1.5.- Objetivos Específicos	19
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	20
2.1 Cementantes alternativos.	20
2.1.1 Clasificación, usos e interés de investigación de los cementantes alternativos.....	23
2.1.2 Cementantes Suplementarios.....	33
2.1.3 Cementantes con base en Sulfato de Calcio.....	34
2.1.4 Cementantes con base en escoria de alto horno (EAH).	37
2.1.5 Cementantes con base en microsílíce (MS).	41
2.1.6 Multi -compuesto AN+EAH+MS como mortero alternativo.....	44
2.2 Aislamiento térmico en las edificaciones.....	45
2.2.1 Conductividad, resistencia y transmitancia térmica.....	49
2.2.2 Pérdida y ganancia de calor, balance térmico de envolventes.....	55
2.2.3 Elementos envolventes de la edificación.....	57
2.3 Eficiencia energética a través del aislamiento térmico.	60
2.3.1 Materiales aislantes térmicos.	62
2.3.2 Confort térmico, temperatura operativa y consignas de temperaturas.	66
2.3.3 Eficiencia y ahorro energético por HVAC.....	71
2.3.4 Modelación y simulación energética por aislamiento térmico.....	72
2.3.5 Beneficio - costo de materiales de construcción	74
2.4 Materiales aislantes avanzados	76

2.4.1 Aerogel de Sílice (AS)	77
2.5 Estado del Arte	84
2.5.1 Nuevas tecnologías para el aislamiento térmico con AS	84
2.5.2 Alternativas para mejorar la resistencia mecánica y los comportamientos del AS....	87
2.5.3 Aditivos surfactantes y tensoactivos para modificación superficial AS	88
MÉTODO DE EXPERIMENTACIÓN.....	92
3.1 Caracterización y propiedades micro y macroestructurales. ..	92
3.1.1 Distribución del tamaño de las partículas (DTP)	94
3.1.2 Densidad real por picnómetro de Helio.....	98
3.1.3 Fluorescencia de rayos X (FRX).....	101
3.1.4 Difracción de rayos X (DRX).....	105
3.1.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS).....	111
3.2 Estudios preliminares y de diseño de mezclas.	115
3.2.1 Obtención del multi compuesto.	116
3.2.2 Proceso de homogenizado y disolución del Aditivo.	116
3.2.3 Determinación de la finura EAH.....	124
3.2.4 Ensayo de la fluidez y la trabajabilidad de la pasta AN-EAH-MS	125
3.2.5 Calibración del Analizador de Propiedades Térmicas.	127
3.2.6 Elaboración de muestras.....	129
3.3 Estudio de la selección de tamaño de partícula AS y aditivo modificador.....	131
3.3.1 Preparación de las pastas.	131
3.3.2 Resistencia mecánica a la compresión.....	136
3.3.3 Conductividad y resistencia térmica.	138
3.4 Estudio de proporción del AS y dosificación aditivo COP..	141
3.4.1 Proporción del AS.....	141
3.4.2 Dosificación del aditivo modificador del AS.....	146
3.5 Modelación y simulación energética.	148
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	153

4.1 Caracterización física y propiedades micro y macroestructurales de los materiales.	153
4.1.1 Distribución de los tamaños de las partículas.....	153
4.1.2 Densidad de los materiales.	168
4.1.3 Fluorescencia de rayos X.....	169
4.1.4 Estudio de adición de CaO para mejorar la basicidad y calidad de la EAH.	172
4.1.5 Análisis mineralógico	173
4.1.6 Microscopía electrónica de barrido.	181
4.2 Fluidez de las mezclas.	187
4.3 Estudio de la selección de tamaño de partícula AS y aditivo modificador.....	190
4.4 Estudio de proporción del agregado AS.	198
4.5 Estudio para dosificación de aditivo modificador COP.....	205
4.6 Modelación y simulación energética.	211
4.6.1 Cálculo de resistencias térmicas por medio del método simplificado prescriptivo para muros.	213
4.6.2 Simulación en modo pasivo.	216
4.6.3 Simulación en modo mecánico.....	227
4.6.4 Simulación en modo mixto.	235
CAPÍTULO 5	244
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	244
Referencias bibliográficas	249
A P É N D I C E S	267
APENDICE A.....	268
ANEXO I.	273
ANEXO II.	283

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Perspectivas Demográficas Mundiales, División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, ONU, 2015.....	5
Figuras 2 y 3. Cuota global de edificios y construcciones en emisiones y energía, 2017	6
Figura 4. Porcentajes de desechos provenientes de diferentes fuentes en el ciclo de vida del material y del producto, datos de países pertenecientes a la OECD [15].....	8
Figura 5. Energía por cada sector, respecto al consumo total de energía, 2016 [16].....	10
Figura 6. Uso final de energía global en edificios y cambio en la intensidad de uso, 2010-17 [1].....	10
Figura 7. Composición del Cemento Portland y los Cementos aluminosos; A) Contenido bajo en alúmina, B) Contenido Medio y C) Alto contenido de alúmina [35].....	28
Figura 8. Diagrama Triangular (C-S-A) de RANKIN donde se muestra los diferentes tipos de escorias, su composición con respecto a otros tipos de cementantes y cemento Portland [45].....	39
Figura 9. Cementos hechos con EAH en diagramas ternarios [35].	41
Figura 10. Conductividad térmica de diversos materiales [5].....	50
Figura 11. Conducción de calor a través de cualquier material, [84].	52
Figura 12. Diagrama de transferencia de calor y equilibrio térmico [96].	57
Figura 13. Intervalos aceptables de temperatura operativa y humedad, de acuerdo con el gráfico del estándar ASHRAE 55 [129].	69

Figura 14. Temperaturas operativas para edificios funcionando en modo pasivo de acuerdo con el estándar ASHRAE 55, método gráfico Dear [131].....	70
Figura 15. Densidad esquelética compuesta por nanoporos en AS [137].	79
Figura 16. Estructura del aerogel y los mecanismos de transferencia del calor envolvente [138].....	80
Figura 17. Línea de tiempo, desarrollo e investigación del AS [138].	82
Figura 18. Alternativas de mejoramiento del AS [138].	83
Figura 19. Modificación superficial partículas de AS [140].....	84
Figura 20. Esquema de difracción de luz teniendo como obstáculo una partícula esférica [152].	94
Figura 21. A) Difracción láser de una partícula esférica, B) Patrón de difracción de partículas grandes y C) Patrón de difracción de partículas pequeñas disco de Airy [149].....	95
Figura 22. A) Difracción láser de una partícula grande, B) Difracción partícula mediana y C) Patrón de difracción de partículas pequeñas [149].....	96
Figura 23. Diagramas de frecuencia de tamaño de partícula y curvas granulométrica [151].	97
Figura 24. Equipo Microtrac S3500 de difracción láser para medición de distribución de tamaños de partículas.....	98
Figura 25. Picnómetro de Helio, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León.	99
Figura 26. Mecanismo de fluorescencia de rayos X en un átomo [152].....	102
Figura 27. A) Balanza analítica PX224 Pioneer Plus Ohaus, B) Fragmentos de mortero en recipiente de molienda, C) Molino Manual Herzog, D) Prensa hidráulica Atlas T25 Specadd.	104
Figura 28. A) Pellets de mortero y molde de aluminio, B y C) Espectrómetro Epsilon 3XLE. EDXRF.	104

Figura 29. DRX moderno del cristal de cloruro de sodio, de forma cuádruple simétrica y cubica	105
Figura 30. A) Proyección de rayos X a través del Cristal de Sulfato de Cobre de Laue 1912. B) Dos ondas de rayos X, reflejadas en dos planos separados por una distancia d y se reflejan en un ángulo θ , para proyectarse en ese mismo ángulo [21,24].	106
Figura 31. Diagrama que muestra la producción de los patrones de polvo de difracción donde los reflejos de rayos X forman un cono de ángulo 4θ [166]. a) Representación de la reflexión en θ - 2θ para la difracción de polvos, que son proyectados a través ranuras, antes y después de golpear la muestra que al estar en un soporte gira en un ángulo de θ , b) al igual que el detector se mueve alrededor del círculo de medición en un ángulo de 2θ dando la geometría que establece la ley de Bragg.....	108
Figura 32. En la imagen se muestra la rotación del sensor, los ángulos de giro e inclinación [169].	109
Figura 33. Difractómetro Empyrean PANalytical.....	110
Figura 34. Equipo SEM modelo JS6510LV, Instituto de Ingeniería Civil, UANL.	114
Figura 35. A) Partículas de AS sin homogenizar, B) homogenizadas en los cementantes, C) Molino de rocas para homogenizado.....	117
Figura 36. Proceso de preparación del mortero con AS [8].	118
Figura 37. A) Cementantes proporcionados para la pasta, B y C) AS A1000.	119
Figura 38. A) Inclusión de partículas de As, B) Resultado de la homogenización, grumos envolventes del AS, C) Observación de partículas de AS envueltas en los cementantes durante el proceso de homogenización.....	119
Figura 39. A) Aditivo COP, B) Partículas de AS suspendidas en agua destilada, C) Partículas de AS suspendidas en el agua, pero envueltas por el aditivo para su modificación superficial.	120

Figura 40. A) AS suspendido sobre el agua por condición hidrófuga, B y C) AS modificado por el aditivo COP, partículas hidrolizadas y sedimentadas.	121
Figura 41. A) Agitador magnético para disolución del COP, B y C) Agitación para disolución de aditivo en agua destilada.	122
Figura 42. A) Partículas de AS sobre superficie de solución Agua+AS+S, B y C) Comparativa de partículas A1000 que permiten observar el cambio de textura de partículas, en el caso del S se vuelven más cristalinas por la absorción de agua en comparación a las partículas suspendidas en la solución de Agua+AS. ...	123
Figura 43. A) Partículas de AS en solución de agua, B) Partículas en solución con Silano y C) Partículas en solución copolímero.....	123
Figura 44. Molino de esferas metálicas marca Swequipos.	124
Figura 45. Proceso de mezclado, vaciado, desmoldado y medición de diámetros de la pasta después de los golpes en la mesa de medición.	127
Figura 46. A) Muestras de Hebel y yeso comercial perforados para medición de la conductividad térmica, B) Medición térmica con el equipo Tempos Meter..	129
Figura 47. A) Molde para muestras de 1" X 1", B) Muestras obtenidas con diferentes condiciones tamaños de partículas y aditivos, C) Proceso de curado de muestras.	130
Figura 48. a) Máquina Universal Instron 600Dx, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, b) Ensayo de resistencia a la compresión muestra con AS.	138
Figura 49. A) Componentes de la aguja o sonda térmica [95], B) Analizador de propiedades térmicas Tempos proceso de calentamiento, C) Ciclo de enfriamiento.	140
Figura 50. Diagrama esquemático de la sonda de aguja para medir la conductividad térmica [96].	140
Figura 51. Dosificación de partículas de AS A3100 considerando el 100% del volumen de los materiales aglutinantes.	143

Figura 52. Planta arquitectónica vivienda unifamiliar prototipo Santa Bárbara (Planta Baja).....	149
Figura 53. Plantas arquitectónicas vivienda unifamiliar prototipo Santa Bárbara (Planta alta).....	150
Figura 54. 1) MC en recubrimiento exterior 2cm (REXT)+block de concreto 15cm y recubrimiento interior de yeso 1.5cms; 2) MC en recubrimiento Exterior e Interior 2cm (REXT-INT) y block de concreto 15 cm; 3) MC en recubrimiento exterior e interior y tabique 14cm (RTAB); 4) MC en Impresión (3D) líneas de recubrimiento exterior e interior y línea de refuerzo interior c/u 2cm y 11 cm de vacío.	151
Figura 55. A) AS A1000; B) AS 3120 01-1.2 mm; C) AS 3110 0.1–07 mm; y D) AS 3100 0.002-0.04 mm.	163
Figura 56. A) DRX de AN con espectros característicos, ubicaciones y proporciones de intensidades similares a este estudio.....	175
Figura 57. A) DRX EAH muestra similitud a la obtenida en este estudio en forma vítrea, amorfa y cristales de carbonato de calcio que sobresalen en las mismas ubicaciones.....	177
Figura 58. Imágenes de DRX que muestran la similitud de espectro amorfo de la MS con el obtenido en esta investigación, A) Quiñones.....	179
Figura 59. Difractogramas obtenidos por A) Khedkar 2019 [170] y B) He 2018 [215].....	180
Figura 60. Imágenes que muestran la superficie y partículas de AN.....	181
Figura 61. Imágenes (SEM) superficie y gránulos de EAH.....	183
Figura 62. Forma y tamaño de gránulos acristalados de EAH.....	183
Figura 63. Imágenes (SEM) superficie y conglomeraciones de partículas de MS.....	185
Figura 64. Imágenes SEM de la superficie de las partículas de AS A1000. ...	186
Figura 65. Imágenes EDS y SEM del MC con AS sin modificación superficial; a) Cristales de AS A3110 en superficie de pasta, imagen obtenida a los 1000	

aumentos; b) Dispersión del agregado AS en pasta y c) Problemas de unión entre partícula A3110 sin modificación superficial en zona de unión entre materiales, imagen a 4000 aumentos	195
Figura 66. Imágenes SEM del MC con AS modificado; a) Forma densa de la pasta a 1000 aumentos, b) Superficie de pasta con poca porosidad a los 2000 aumentos y c) Formación de cristales atribuidas al uso del aditivo COP imagen a 4000 aumentos.	196
Figura 67. EDS y SEM del MC con AS 3100 modificado; a) Identificación del AS a través de su composición química, b) Dispersión de partículas en MC y c) Partículas A3100 en superficie del MC.	196
Figura 68. Imágenes SEM, a) Superficie de pastas con agregado AS, b) Conglomerado obtenido con aditivo S; c) Pasta elaborada con aditivo COP en una superficie más homogénea y densa.	197
Figura 69. EDS, A) Composición e imagen de MC, B) Conglomerado obtenido con aditivo S; C) Superficie de pasta A3100 y aditivo COP.....	198
Figura 70. Microscopía de partícula de AS modificado e imagen EDS donde se observan los elementos de composición del mortero.	209
Figura 71. Modelación de vivienda con ubicación y orientación geográfica para aplicar afectantes climáticas de la zona térmica, como es el caso del asoleamiento, temperatura exterior y radiación solar.	211

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica

Página

Gráfica 01. Proporción de materiales empleados en los diferentes morteros a evaluar.....	142
Gráfica 02. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac....	155
Gráfica 03. Campana de Gaus distribución de tamaños de partículas AN.	155
Gráfica 04. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac Escoria de alto horno.....	156
Gráfica 05. Campana de Gaus distribución de tamaños de partículas Escoria de Alto Horno.....	157
Gráfica 06. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac, MS.	159
Gráfica 07. Campana de Gaus distribución de tamaños de partículas MS.....	159
Gráfica 08. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac AS A3120, A3110, A3100 y A1000.....	164
Gráfica 09. Campana de Gaus distribución de tamaños de partículas AS A3120, A3110, A3100 y A1000.	165
Gráfica 10. Distribución de tamaños de partículas de materiales cementantes y agregados AN+EAH+MS+AS.	166
Gráfica 11. Campana de Gaus distribución de tamaños de partículas Cementantes y agregados AN+EAH+MS+AS.	167
Gráfica 12. Gráfico de resultados de ensayo de resistencia a la compresión con muestras cúbicas de 2"X2"	173
Gráfica 13. DRX AN.....	175
Gráfica 14. DRX EAH.	177
Gráfica 15. DRX MS.	179

Gráfica 16. DRX AS, espectro característico de un material amorfo.	180
Gráfica 17. Esfuerzos de compresión de muestras ensayadas a 7 y 28 días.	191
Gráfica 18. Medición de conductividad térmica de pastas AH+EAH+MS con agregados de AS con diferentes tamaños de partículas, aditivos Copolímero y Silano.....	193
Gráfica 19. Medición de resistencia térmica a muestras con AS, AS con Copolímero (AS+COP) y AS con Silano (AS+S) como surfactantes.	194
Gráfica 20. Comportamiento térmico y resistencia mecánica a la compresión a los 28 días de fraguado de pastas con partículas de AS modificado.....	194
Gráfica 21. Resistencia mecánica a la compresión de morteros con diferentes proporciones de AS modificado.	199
Gráfica 22. Conductividad térmica de morteros con diferentes proporciones de AS modificado.....	200
Gráfica 23. DRX Fases mineralógicas de morteros con diferentes proporciones de AS a los 28 días.....	203
Gráfica 24. Fases mineralógicas en muestras con diferentes contenidos AS.	204
Gráfica 25. Resultados estudio de resistencia a la compresión para determinación de dosificación de aditivo copolímero.	205
Gráfica 26. Análisis de comportamiento térmico realizado en tres ensayos para muestras con diferentes dosificaciones de aditivo.	207
Gráfica 27. FRX Composición de óxidos en diferentes edades de hidratación.	208
Gráfica 28. Temperatura operativa anual 2021 (Área social).	217
Gráfica 29. Temperatura operativa, semana extrema de verano 2021 (Área social).	218
Gráfica 30. Temperatura operativa, semana extrema SCO y 3D en Modo Pasivo (MP), área social.....	219

Gráfica 31. Simulación horaria anual SCO (Área social).	221
Gráfica 32. Simulación horaria anual 3D (Área social).	221
Gráfica 33. Horas dentro del 90% de confort adaptativo (Área Social).....	222
Gráfica 34. Horas dentro del 80% de confort adaptativo (Área social).	223
Gráfica 35. Balance térmico anual de pérdida y ganancias de calor SCO.....	225
Gráfica 36. Balance térmico anual de pérdida y ganancias de calor 3D.....	225
Gráfica 37 y 38. Balance térmico desglosado de pérdida y ganancias de calor SCO y 3D.....	226
Gráfica 39. Balance térmico anual de pérdida y ganancia de calor en muros.	226
Gráfica 40. Demanda anual de energía para enfriamiento y calentamiento de espacios.....	228
Gráfica 41. Energía térmica anual para climatización de espacios.....	229
Gráfica 42. Energía térmica anual total para climatización de espacios.	230
Gráfica 43. Temperatura operativa en Área social (Modo mecánico).	231
Gráfica 44. Pérdidas y ganancias de calor en muros (Modo mecánico).	232
Gráfica 45. Consumo total de energía (Modo mecánico).....	233
Gráfica 46. Demanda anual de energía para enfriamiento y calentamiento de espacios (modo Mixto).....	236
Gráfica 47. Energía térmica anual para climatización de espacios (modo mixto).	237
Gráfica 48. Energía térmica anual total para climatización de espacios (modo mixto).....	238
Gráfica 49. Condiciones de temperatura operativa anual (modo mixto).	238
Gráfica 50. Horas en disconfort anual (modo mixto).....	239
Gráfica 51. Balance térmico en muros (modo mixto).	240
Gráfica 52. Estimación de energía consumida (modo mixto).....	241

Gráfica 53. Comparación del consumo de energía en funcionamiento mecánico y mixto. 243

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Comparación de cementos alternativos y cemento portland [40].	22
Tabla 3. Porcentajes de componentes químicos del Cemento Aluminato de Calcio. Información basada en: Bizzozero et al. [46], Ukrainczyk et al. [47] y Matusinovic et al. [48].	27
Tabla 4. Comparación de principales componentes químicos del cemento Portland y cementos aluminosos [35].	28
Tabla 5. Contenido de minerales en cementos de aluminato de calcio, información retomada de: Bizzozero et al. [46].	28
Tabla 6. Comparación de principales componentes minerales del cemento Portland y cementos aluminosos [35].	28
Tabla 7. Porcentajes de componentes químicos de EAH [35].	41
Tabla 8. Materiales aislantes referenciados de acuerdo a su conductividad térmica [19].	48
Tabla 9. Clasificación de materiales aislantes [112]	65
Tabla 10. Efectos de modificación de superficie en partículas de AS.	123
Tabla 11. Conductividad térmica placa termoaislante Hebel y pasta de yeso, con sensores TR-3 y RK3.	128
Tabla 12. Proporciones para elaboración de pastas (g).	132
Tabla 13. Estimación de volumen de pasta necesaria para el estudio de determinación del tamaño de partícula AS y Aditivos (g).	133
Tabla 14. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A3100.	134

Tabla 15. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A3110.....	134
Tabla 16. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A3120.....	135
Tabla 17. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A1000.....	135
Tabla 18. Composición de muestras para estudio del tamaño de partícula de AS y aditivo modificador.	137
Tabla 19. Composición de muestras estudio de proporción de AS.	142
Tabla 20. Estimación de volumen de mortero necesario para estudio de la dosificación del AS (g).	143
Tabla 21. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS30 partículas A3100.	144
Tabla 22. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS50 partículas A3100.	144
Tabla 23. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS65 partículas A3100.	145
Tabla 24. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS80 partículas A3100.	145
Tabla 25. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS100 partículas A3100.	146
Tabla 26. Composición de muestras estudio de dosificación del aditivo modificador.	147
Tabla 27. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac....	154
Tabla 28. Porcentajes de material EscoriaM de Alto Horno que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac.	157
Tabla 29. Porcentajes de partículas de Microsílice que pasan por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac.	158

Tabla 30. Tamaños de partículas de Aerogel A1000, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.	160
Tabla 31. Tamaños de partículas de Aerogel A3120, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.	161
Tabla 32. Tamaños de partículas de Aerogel A3110, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.	161
Tabla 33. Tamaños de partículas de Aerogel A3100, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.	162
Tabla 34. Densidades obtenidas por medio del Picnómetro de Helio.	168
Tabla 35. Densidades de las partículas de AS para su proporcionamiento en pastas y morteros.	169
Tabla 36. Composición química elemental AN.	169
Tabla 37. Composición química elemental MS.	170
Tabla 38. Composición química elemental AS.	170
Tabla 39. Composición química elemental EAH.	170
Tabla 40. Composición química elemental y densidad de componentes AN+EAH+MS+AS.	171
Tabla 41. Diseño de morteros para estudio de adición de CaO (g) para complemento de la EAH.	172
Tabla 42. Medición de la fluidez de la pasta.	187
Tabla 43. Fluidez calculada por porcentaje de agua y volumen de cementantes 0.50, 0.60 y 0.65.	187
Tabla 44. Fluidez calculada por porcentaje de agua y volumen de cementantes 0.70, 0.75 y 0.80.	188
Tabla 45. Relación de resistencia y conductividad de pastas y morteros.	200
Tabla 46. Propiedades de pastas y morteros comparados con otras investigaciones.	210

Tabla 47. Propiedades de pastas y morteros comparados con normativas. .	213
Tabla 48. Cálculo de la Resistencia Total en muros método simplificado prescriptivo de aplicación manual de la NMX-C-460 y comparativa con calculos obtenidas por simulación.	214
Tabla 49. Cálculo de consumo totales de energías para climatización (kWh).	229
Tabla 50. Cálculo de prestación energética por factor de superficie.	234
Tabla 51. Cálculo del consumo total de energía por medio del método HVAC simple (kWh).....	237
Tabla 52. Comparación de consumo de energía anual por factor de superficie.	242
Tabla 53. Cálculo de costos empleados para funcionamiento mecánico y mixto.	243

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Conductividad Térmica
μm	Micras
\leq	Menor o igual que
\geq	Mayor o igual que
$<$	Menor que
$>$	Mayor que
\sim	Aproximadamente.
ΔT	Temperatura efectiva
\AA	Ángstrom
\pm	Signo de más menos
$\text{\textcircled{R}}$	Marca registrada
A	Letra Alpha
B	Letra Beta
γ	Letra Gamma

NOMENCLATURA

a.C.	Antes de cristo.
A/F	Relación Aluminio – hierro.
AIE	Agencia Internacional de la Energía.
Al₂O₃	Alúmina o óxido de aluminio.
AN	Anhidrita.
AN+EAH+MS	Compuesto conformado por Anhidrita, Escoria de alto Horno y Microsílice.
AS	Aerogel de Sílice.
ASHRAE	<i>American Society of Heating, refrigerating and Air Conditioning Engineers.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CaO	Cal o óxido de calcio.
CaSO₄	Sulfato de Calcio.
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers.</i>
CO₂	Dióxido de Carbono.
CoP	Coeficiente de rendimiento o eficiencia.
CPO	Cemento Portland Ordinario.
c.p.s	Cuenta por segundo.
CSA	Cemento sulfo-aluminato de calcio.
C-S-H	Hidrato de silicato de calcio.
°C	Grados centígrados.
CuKα	Radiación copper con cobre.
EAH	Escoria de Alto Horno.
EN15743	Norma Europea sobre el cemento sobre sulfatado.
EN196	Norma Europea para métodos de ensayo de cementos.
EPS	Poliestireno expandido.

Ev	Electronvoltio medida de energía eléctrica usada en física atómica.
Gt	Gigatoneladas 1, 000 millones de toneladas métricas, unidad de masa.
KeV	Kilo electronvoltio 1keV= 10 ³ eV.
kg/m³	Unidad de densidad.
kg CO2 eq	Medida kilogramos de dióxido de carbono equivalente, que representa la emisión total de gases de efecto invernadero.
kg CO2 eq/kW/h	Dióxido de carbono equivalente por kW/h.
kq	Coeficiente de calidad.
Kα	Radiación copper.
h	Hora medida de tiempo.
HP	Caballos de fuerza (<i>horsepower</i>).
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado.
Mb	Módulo de basicidad.
MC	Multi – compuesto.
MgO	Óxido de Magnesio.
mJ/m²	Unidad de tensión superficial.
m²/kg	Metros cuadrados por Kilogramos medida área superficial.
MPa	Mega Pascal unidad de presión equivalente a N/mm ² .
MS	Micro-Sílice.
m²/g	Unidad de superficie específica, relación entre el área y la masa de un determinado sólido.
N	Newton, medida de fuerza.
NFP15-313	Normativa Francesa para cementos super sulfatados.
nm	Nanómetro unidad de medida equivalente a una millonésima parte del metro.
N/mm²	Newton sobre milímetro cuadrado, unidad de presión.
Net-Zero	Emisiones de Dióxido de Carbono netas igual a cero.
nZEB	<i>Nearly Zero Energy Buildings</i> .

OC DS III-W1-T1

	Clasificación de material aislante, monocapa, absorción media y conductividad térmica muy baja.
OH	Grupo funcional hidroxilo característico de los alcoholes, con condición hidrófila.
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
OPC	<i>Ordinary Portland cement.</i>
pH	Medida de acidez o alcalinidad de un líquido.
PMV	Voto medio pronosticado.
PPD	Porcentaje de personas en discomfort.
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
PUR	Poliuretano.
SSC	Cementos Super sulfatados.
t	Tonelada, unidad de masa equivalente a 1,000 kg.
µm	Micras.
UHI	<i>Urban Heat Island.</i>
UNE-EN	Normalización Europeas aplicadas en España.
VG	acristalamientos con vacío.
VIP	Paneles de aislamiento al vacío
W/B	Relación agua – aglutinante.
W/mK	Sistema Internacional unidad de conductividad térmica (Valor k). Vatios o Watts por metro-Kelvin.
XPS	Poliestireno extruido.
YD	Yeso de Desecho.

Resumen

Ricardo Valdez Cano

Fecha de graduación: agosto 2023

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: AISLAMIENTO TÉRMICO CON AEROGEL DE SÍLICE MODIFICADO, EN UN MORTERO ALTERNATIVO PARA ENVOLVENTES DE LA EDIFICACIÓN.

Número de páginas: 305

Candidato para el grado de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción.

Área de Estudio: Materiales de construcción.

Propósito y Método de Estudio:

El Aerogel, por sus propiedades nanométricas, fue la pieza fundamental de estudio ya que su principal aportación es suministrar la baja conductividad térmica al multi-compuesto, razón por la que esta investigación se enfocó en evaluar su contribución térmica, determinar un procedimiento para contrarrestar su baja energía superficial mejorando su compatibilidad en el mortero, y por último evaluar los comportamientos mecánicos generados por su incorporación, para con esto conseguir que cumpla las especificaciones y normativas establecidas.

A través de esta investigación se desarrolló un mortero con alto desempeño como aislamiento térmico, una alternativa para la protección de elementos envolventes en la edificación, de naturaleza eco-eficiente al ser conformado por residuos industriales como el Yeso de Desecho (YD), Escoria de Alto Horno (EAH) generada durante la producción del hierro y Micro sílice (MS) para obtener la matriz base que permitió la evaluación de las ventajas por incorporar el Aerogel de Sílice (AS) en diferentes proporciones.

Contribuciones y Conclusiones: La relevancia de esta investigación radica en producir un mortero que, como elemento constructivo, reduzca el consumo de energías por acondicionamiento térmico de espacios, tanto en la rehabilitación energética de los edificios antiguos, como en el aislamiento de los nuevos, para así reducir la afectación al medio ambiente por ahorro de energías, a través de la construcción basada en la eficiencia energética.

Firma del Asesor:

Abstract

Ricardo Valdez Cano

Graduation Date: August 2023

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Title of the Study: THERMAL INSULATION WITH MODIFIED SILICA AEROGEL IN AN ALTERNATIVE MORTAR FOR BUILDING ENVELOPES.

Number of pages: 305

Candidate for the degree of Doctorate in Engineering with Orientation in Construction Materials.

Área of Study: Building Materials.

Purpose and Method of Study:

Aerogel, due to its nanometric properties, will be the fundamental piece of study, since its main contribution will be to provide low thermal conductivity to the multi-compound, reason why this research will focus on evaluating its thermal contribution, determining a procedure to counteract its low surface energy, improving its compatibility in the mortar, and finally evaluating the mechanical behaviors generated by its incorporation, in order to achieve compliance with the established specifications and regulations.

This research seeks to develop a mortar with high performance as thermal insulation, an alternative for the protection of building envelope elements, of an eco-efficient nature to be conformed by industrial waste such as Waste Gypsum (YD), Blast Furnace Slag (EAH) generated during the production of iron, and Silica Fume (MS) to obtain the base matrix, which will allow the evaluation of the advantages of incorporating Silica Aerogel (AS) in different proportions.

Contributions and Conclusions: The relevance of this research lies in producing a mortar that, as a construction element, reduces energy consumption by thermal conditioning of spaces, both in the energy rehabilitation of old buildings and in the insulation of new ones, thus reducing the impact on the environment by saving energy through construction based on energy efficiency.

Signature of the advisor:

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es uno de los principales causantes de problemas al medio ambiente; por lo tanto, se convierte en el medio para aportar medidas que remedien y aminoren de manera más efectiva el consumo de energías y emisiones de CO₂ a la atmósfera [1].

Actualmente, se están estableciendo y promoviendo las características que deben ser consideradas para que las envolventes de las edificaciones, a través del aislamiento térmico y los materiales que brinden una mayor protección por temperaturas e inclemencias del clima, limiten las demandas de energías por calefacción, ventilación y refrigeración en los edificios [1].

Estas consideraciones tendrían que ser aplicadas, no sólo en los nuevos proyectos y en la nueva construcción, sino que se tiene que poner atención en el actual patrimonio edificado, con la finalidad de ser rehabilitados energéticamente [2]. Por lo tanto, es primordial el estudio y el desarrollo de nuevas tecnologías para el mejoramiento y el confort térmico [3], así como encontrar materiales para la construcción que favorezcan la comodidad térmica de los espacios, con respecto al clima en cada región, que tengan la capacidad de controlar y reducir, a través de sus propiedades aislantes, la transmisión de la temperatura exterior al interior en zonas cálidas o frías.

Distintos estudios han obtenido y estudiado nuevos materiales, morteros mejorados térmicamente a través de la incorporación de agregados y nanomateriales, que han favorecido la construcción de edificios evaluados energéticamente como se hace a través de la metodología Net Zero (nZEB) [4].

El uso de materiales como el AS, considerado como un super- aislante, ha llevado a dirigir investigaciones para ampliar sus aplicaciones y aprovechar sus cualidades de baja conductividad térmica de 0.01- 0.02 W/mK [5], resultado del equilibrio de su esqueleto sólido y alta porosidad, que provoca baja conductividad gaseosa y baja transmisión infrarroja radiactiva que le proporciona una conductividad térmica más baja que la del aire, que se estima en 0.066 W/mK [3,6].

La estructura del AS está basada en una red mesoporosa que suprime la conducción del calor a través de su espacio vacío, efecto llamado Knudsen [7]; como consecuencia, los estudios se han enfocado en aprovechar las propiedades de las partículas de AS para formar nuevos materiales y diversos sistemas constructivos más eficientes, en comparación con los que convencionalmente se utilizan [5].

Esta investigación buscó que el mortero multi -compuesto alternativo (MC) que tiene la característica de ser ecoeficiente por estar integrado en su composición por residuos industriales a los que se les da una revalorización, reutilizándolos como propuesta basada en una economía circular, además de ampliar su ciclo de vida, agregando AS para funcionar como una opción de aislamiento para la edificación.

Por lo tanto, se solucionan los problemas de compatibilización y modificación de energía superficial del AS, para conseguir los requerimientos mecánicos que se establecen y su aplicación pueda ampliarse en elementos que recubren los edificios, para que de este modo se favorezca el ahorro de energía y, por consiguiente, la disminución del impacto generado al medio ambiente por la construcción.

En nuestros días, los medios y programas computacionales favorecen estudios complejos como el cálculo de eficiencia energética, que permite conocer los comportamientos de los elementos envolventes de los espacios, para determinar sus beneficios o afectaciones por medio de simulaciones en funcionamiento pasivo, mixto o mecánico, generando evaluaciones sobre estrategias de construcción que favorezcan al ahorro y la eficiencia de energía en un determinado tiempo y lugar.

En esta investigación se evaluaron los muros de una vivienda de construcción tradicional, contra cuatro aplicaciones del MC para optimizar sus características térmicas como solución a la construcción en clima cálido, como el de Torreón, Coahuila.

1.1.- Planteamiento del Problema

Las ciudades tienen grandes retos, entre ellos, el crecimiento y la concentración de habitantes son dos aspectos que aumentan el metabolismo urbano, el requerimiento de más edificación, la necesidad de subsanar carencia y rezago de vivienda, infraestructura y equipamiento [8].

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) estima que, en el nivel mundial, cada semana 1.4 millones de personas se desplazan a las ciudades, por lo que se pronostica que cerca de 2,500 millones de personas adicionales vivirán en las ciudades para el 2050 [1], esto aunado a las perspectivas del crecimiento demográfico de la población, que incrementa uno de los sectores de mayor impacto al medio ambiente, la Industria de la Construcción, **Figura 1**.

La huella de Carbono y el efecto invernadero son dos de los problemas de prioridad para ser mitigados en el planeta, reduciéndolos se podría detener el calentamiento global, que cada año tiende a crecer, amenazar al medio ambiente y a la biodiversidad [9].

En el Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se menciona que es primordial disminuir las emisiones de gases, en especial [10], el que contribuye de gran manera a este problema como es el dióxido de Carbono (CO₂). Se estima que para el 2030 el total de emisiones llegue a ser de hasta 56 Gt, número muy por encima de 45 Gt, cantidad que fue considerada límite para evitar el aumento de la temperatura en menos de dos grados al final del siglo [11], y que actualmente ya se considera sobrepasada, por

lo que se deben tomar acciones en este caso a través de la construcción, para disminuir la producción de CO₂ en todos los procesos y aminorar la afectación.

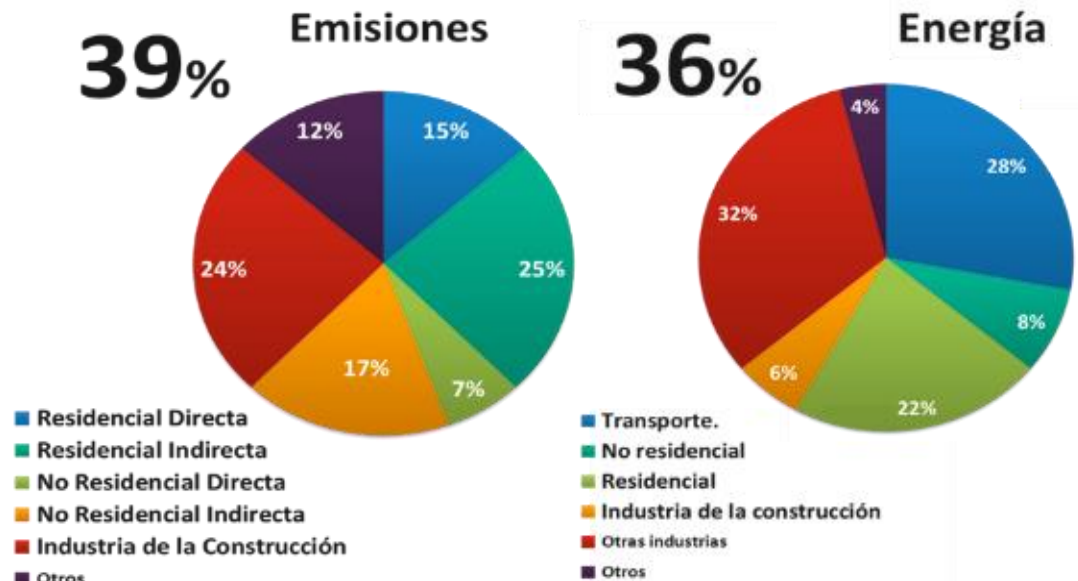


Figura 1. *Perspectivas Demográficas Mundiales, División de Población del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, ONU, 2015 [18].*

La industria de la construcción y todo lo relacionado con ella, en cada una de sus etapas, como el proceso de construcción, el uso y la demolición, son responsables del 39% del total de CO₂ expulsado a la atmósfera, **Figura 2**; además de ser este sector, el de los mayores consumidores de energía y manejo de una importante cantidad de materias primas, algunas provenientes de procesos de industrialización de considerables afectaciones al medio ambiente; por ejemplo: el cemento, el acero y el aluminio, **Figura 3**.

Otro aspecto es el empleo de maquinaria pesada en el proceso de construcción y el transporte de materiales, así como la generación de residuos sólidos que suman hasta un 30% del global generado de CO₂ y la contaminación del agua con el 20% de la consumida en el mundo [12]. Además, se debe

considerar que el crecimiento global en la construcción es de un 3% anual [13], por lo que estos porcentajes se incrementarán en la misma proporción que el crecimiento de la población.



Figuras 2 y 3. Cuota global de edificios y construcciones en emisiones y energía, 2017 [1].

Otra manera para contribuir con la disminución del consumo de energía y emisiones de contaminantes a la atmósfera, es reducir el empleo de algunos materiales que por sus técnicas convencionales de producción, son altamente contaminantes; por ejemplo: el cemento y su industrialización, el cual se considera el material fabricado por el hombre más utilizado que existe, el segundo después del agua como recurso consumido en el planeta, que durante su producción se emplea una gran cantidad de energía y recursos naturales, siendo fuente del 5% aproximadamente de las emisiones mundiales de CO₂.

Esta industria produce 1.6 billones de toneladas de cemento al año y para cada tonelada se origina una tonelada de CO₂ a la atmósfera. A esto se suma que durante el proceso de construcción se emplean maquinarias y transporte de

materiales que constituye de un 6 a un 8% de las emisiones totales para un proyecto [14]; todo esto muestra que es de suma importancia eficientizar el empleo de este material por medio de otras tecnologías ecoeficientes, como son los cementantes alternativos, donde se incluyen materiales de desecho para darles un destino final con menor impacto ambiental, alargando su ciclo de vida y evitando que sean fuentes de contaminación.

Por otro lado, se estima que se generan entre 7,000 a 10,000 millones de toneladas (t) de residuos, incluyendo urbanos, industriales, de construcción y demolición; estos últimos representando un 36% del total por año impactando en gran medida en la salud y el medio ambiente, simplemente por su concentración en lugares que no son adecuados, afectando suelos, aire y a veces hasta mantos acuíferos, mientras que pudieran haber sido aprovechados para darles una disposición final diferente y de mayor beneficio, por ejemplo, ser compuestos de nuevos materiales alternativos y con ello bajar el consumo de recursos naturales y producción de materia prima, **Figura 4**.

Una forma de transformar los problemas generados por los residuos es considerar la aplicación sistemática de las 7Rs (Reciclar, Reutilizar, Reducir, Rediseñar, Reparar, Renovar y Recuperar). Se considera que, sólo usando el enfoque de ciclo de vida de materiales, se pudiera reducir del 10 al 15% las emisiones globales de gases generados por la edificación [15]; por lo tanto, es primordial que la industria de la construcción priorice la utilización de materiales que provengan del reciclaje sobre los de nueva fabricación.

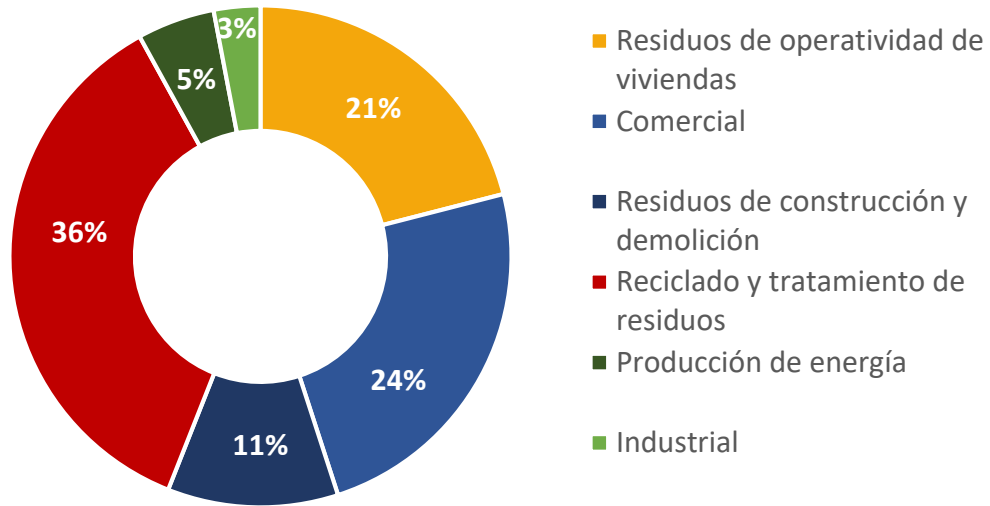


Figura 4. Porcentajes de desechos provenientes de diferentes fuentes en el ciclo de vida del material y del producto, datos de países pertenecientes a la OECD [15].

Los avances tecnológicos y la ciencia de la construcción están contribuyendo en encontrar sistemas alternativos más amigables al medio ambiente. Los estudios se están enfocando en la reutilización de desechos, buscando aprovechar sus características, formar compuestos con propiedades mejoradas y únicas, modificarlos desde su composición micro -estructural hasta de manera nanométrica, todo con el propósito de encontrar materiales de mayor beneficio ambiental.

El sector de la edificación presenta un crecimiento anual del 3% en los últimos dos años [2], un 39% en sus emisiones de CO₂ y un 36% en el consumo de energía por diversos factores, como su demanda en la calefacción y refrigeración, que representan la quinta parte del aumento global de energía en el 2018 [16], además de que se continúa difundiendo la construcción a través de tecnologías y materiales de poca eficiencia térmica.

Por tal motivo, la industria de la construcción se ha vuelto un sector importante para mitigar el impacto al medio ambiente, debe contribuir en minimizar el empleo de energía a través de la construcción bioclimática y de alternativas pasivas, pues actualmente se estima que los edificios consumen el 40% de energía mundial [17], y su consumo aumentará un 50% más para el año 2050 [2]; por lo tanto, es primordial construir edificaciones que cumplan los estándares para ser consideradas Net-Zero (de emisiones cercanas a nulas emisiones), dando prioridad a la elección y utilización de materiales aislantes así como nuevas tecnologías para las envolventes que reduzcan el consumo de energía operativa de la edificación.

El Informe de la Agencia Internacional de Energía (AIE 2018), menciona que estas determinaciones llevadas a cabo en la construcción han evitado en gran manera, el crecimiento desmedido del uso de energías para refrigeración de espacios y disminuyendo las de calefacción [1], además se define que uno de los aspectos que afectan en gran medida a nuestro entorno, no sólo es el construir una nueva edificación, sino también son todos aquellos inmuebles que por su antigüedad no fueron construidos ni aislados correctamente, por lo que hoy en día, consumen una gran cantidad de energía para sus sistemas de acondicionamiento de aire.

Desde el 2010 la energía utilizada por los sistemas de refrigeración ha aumentado en un 25% y actualmente hay más de 1,600 millones de unidades de aire acondicionado en los edificios de todo el mundo [17]. La energía empleada para el confort térmico representa el 51% del consumo final y por su origen

(producción con combustibles fósiles), contribuyen con el 40% de las emisiones globales de CO₂, **Figura 5**. [16], motivo por lo que se buscan soluciones a esta situación, generando nuevas tecnologías y materiales eficientes, que logren un aislamiento adecuado de los espacios para reducir el uso de sistemas de climatización y con ello el consumo de energía, **Figura 6** [18].

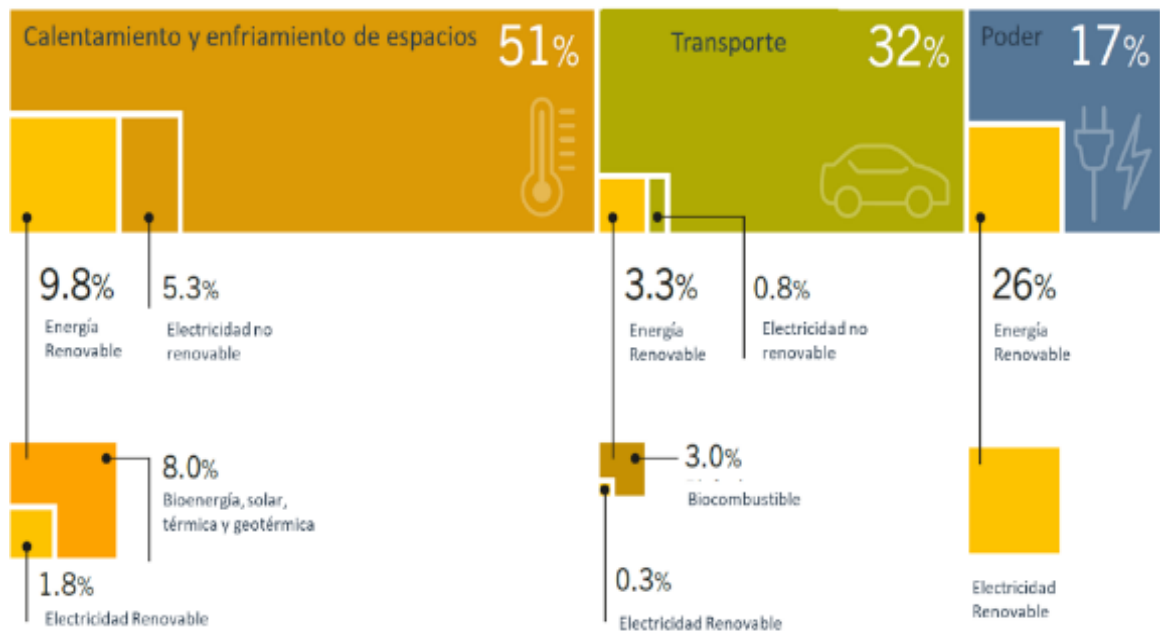


Figura 5. Energía por cada sector, respecto al consumo total de energía, 2016 [16].

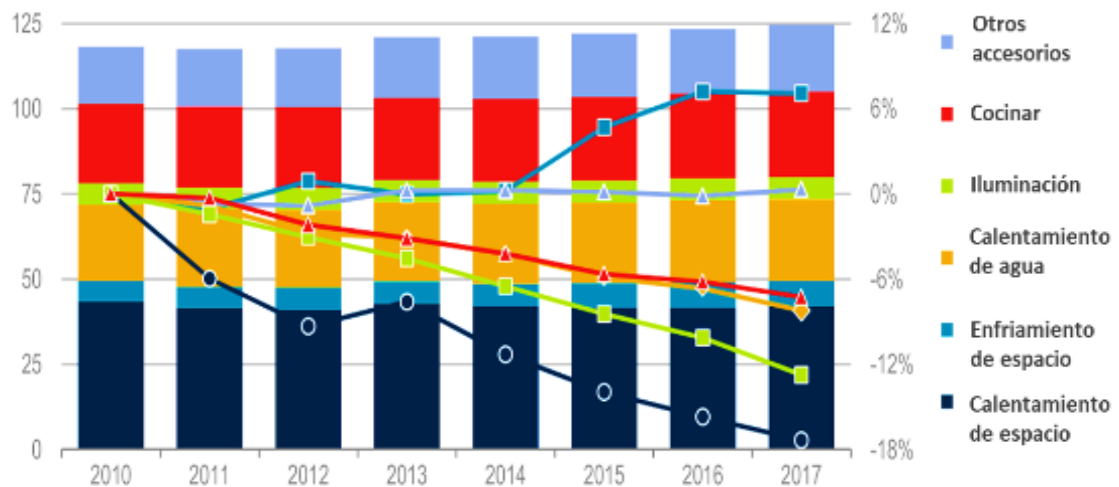


Figura 6. Uso final de energía global en edificios y cambio en la intensidad de uso, 2010-17 [1].

Se han desarrollado diversos materiales aislantes que son de uso convencional, como el poliestireno y el poliuretano, que actualmente son aprovechados y experimentados en diversas aplicaciones de la construcción, consiguiendo altos niveles de eficiencia energética. El mortero que se busca obtener tiene que presentar alto aislamiento térmico, lo más cercano posible a 0.1 W/mK , por lo que en su composición se integra el AS, material que presenta muy baja conducción térmica, estimada en 0.012 a 0.02 W/mK [19], además de presentar el efecto Knudsen que se refiere al reemplazo de aire por otros gases o vacío dentro de su estructura mesoporosa, donde su alta porosidad, con poros de hasta 20 nm , evitan y filtran la trayectoria libre del aire que se estima en 69 nm [18], impidiendo la comunicación del calor.

Su estructura tiene un volumen de aire de 99% que lo hace muy ligero y que retiene la conducción y la convección del calor a través de su espesor, mientras tanto su área superficial de $1,000 \text{ m}^2/\text{g}$, evita la comunicación del calor a través de la radiación y la conducción [5].

Durante el proceso de síntesis se obtiene un aerogel de condición hidrófila con grupos terminales OH, que provoca que con el tiempo su estructura colapse debido a la absorción de la humedad de la atmósfera [20], razón por la cual es que se mejoran sus propiedades físicas y químicas mediante el método de sililación [21], para así, obtener grupos terminales reactivos que proporcionen características hidrófugas al aerogel, logrando estabilidad física, térmica, baja conductividad, alta porosidad, baja energía libre en su superficie y mecánicamente más fuerte [21,22].

Su aplicación es aún limitada, en comparación con otros materiales como las espumas y fibras, porque al emplearlo en morteros y pastas resta resistencia mecánica a los compuestos [18,22], provocando problemas de compatibilización por su condición hidrófuga que provoca agrietamientos, fisuras, contracciones e inclusión de aire en la zona de unión o interfaz (fase sólida Aerogel y la fase líquida mortero) [7,23].

Hoy en día se experimenta para la modificación de la energía superficial del AS, con el objetivo de integrarlo como agregado en compuestos y aprovechar sus cualidades aislantes en la construcción. Se han utilizado diversos métodos físicos, de aplicación de energías y los que han resultado más factibles los métodos químicos, que son los recomendados para los tamaños de partículas que se manejan en esta investigación [2,7].

Se han evaluado diversos surfactantes tenso-activos iónicos que permiten elevar la energía de la superficie del AS, disminuyendo su hidrofobicidad, consiguiendo una piel hidrófila con cargas negativas, otorgando la energía necesaria para su conexión con la parte líquida del mortero con el propósito de aminorar los efectos de compatibilidad e inclusión de aire que provocan dificultades mecánicas [2,24- 25]; la energía del AS de 45.95 mJ/m^2 [26], se debe incrementar para acercarse 72.5 mJ/m^2 , correspondiente a la energía que presenta el agua para ser absorbida [5,18], disminuir el ángulo de contacto para que se aproxime a 90° , con el fin de mejorar las respuestas mecánicas del mortero y, por consiguiente, ampliar sus aplicaciones como material de construcción.

Este trabajo de investigación se concentra en mejorar el MC formado por yeso en su fase AN, EAH y MS [27], a través de la incorporación de partículas de AS, con el fin de precisar su beneficio térmico, determinando sus desventajas en otras propiedades como físicas y químicas, en aspectos que pueden interferir en su forma micro-estructural, superficie, cohesión y que afecten o beneficien en su comportamiento mecánico; se determinan las condiciones ideales, proporciones y características que el compuesto mejorado debe cumplir para presentar las propiedades requeridas y establecidas para su empleo como elemento envolvente de la edificación.

La Norma ASTM 270 [28], menciona que para los morteros de yeso y otros agregados se necesita presentar una resistencia de 2.8 a 5.2 MPa; en cuanto a la norma europea UNE-EN 998 [29], menciona que este mortero se clasifica como OC CS III- W1 – T1, material muy aislante, para uso como acabado monocapa, de resistencia recomendada entre 3.5 a 7.5 N/mm², absorción de agua media y de muy baja conductividad térmica. Se sugiere un espesor de 10 a 15 mm con la propiedad de tener alta resistencia a la filtración con aditivos hidrofugantes e impermeable.

Se determina cuál será el sistema o elemento constructivo donde se aplicará el MC mejorado, ya sea como recubrimiento, panel o algún elemento de mampostería, precisando su mayor beneficio e impacto en el ahorro de energías; se estima que la incidencia del calor a través de los muros se eleva hasta un 70% [30], y que, gracias a los materiales aislantes utilizados en estos elementos constructivos, se puede influir en el consumo de energías por sistemas de

acondicionamiento de aire [31]. Se estima que el ahorro por enfriamiento de espacios puede alcanzar 15.2% sólo en el verano y de un 35 a 47% durante todo el año [32]. La protección en muros puede conseguir ahorrar hasta un 77% de energía por climatización [33].

Se estudiará el nivel de conductividad, resistencia y transmisión térmica del mortero en diferentes aplicaciones mediante la modelación y simulación energética, determinando las horas anuales de confort y discomfort, las condiciones ambientales internas de algunos espacios, balances térmicos, demandas y consumos energéticos por calefacción y refrigeración, costos anuales y por último el factor de beneficio-costos [32].

La NMX-460 ONNCCE-2009 menciona que el valor “R” de los componentes de un muro como mínimo debe ser mayor a 1.0 W/mK, para que un espacio sea habitable 1.8 y para ahorro de energía 2.10 W/mK; así mismo, se establece que para edificios en clima extremoso cálido seco, el consumo de energía por factor de superficie en índice bajo es de <160 kWh/m² y el intervalo de consumo común es de 300 a 160 kWh/m²

Por consiguiente, el nuevo mortero es eco-eficiente por los residuos industriales incorporados en su composición, es una alternativa para reducir la utilización del cemento, una opción de aislamiento térmico que contribuirá a obtener construcciones sustentables y de eficiencia energética, una alternativa pasiva de aislamiento térmico de construcción bioclimática en zonas con climas extremos, reduciendo el problema del consumo de energía y mitigando la afectación al medio ambiente.

Preguntas de Investigación.

¿Cómo el MC de YD, EAH, MS y partículas de AS puede funcionar como un mortero de alto aislamiento térmico que cumpla los requerimientos mecánicos aplicados a elementos utilizados en envolventes de la edificación?

1.- ¿Cuál será el efecto térmico y mecánico del sistema cementante YD+EAH+MS al adherirle diferentes dosificaciones y tamaños de partículas de AS?

2.- ¿Qué aditivos y en qué dosificación podrán contribuir a modificar la energía superficial de las partículas del AS, que eviten los problemas en la zona de interface entre el MC y las partículas de AS, permitiendo mejorar sus comportamientos mecánicos?

3.- ¿En qué elemento constructivo envolvente de la edificación será más pertinente aplicar esta nueva alternativa de aislamiento térmico, que consiga el mayor beneficio en cuanto ahorro y eficiencia energética de la construcción?

4.- ¿En qué medida es factible el empleo de esta alternativa como elemento de aislamiento y sistema constructivo, considerando su beneficio costo ambiental en cuanto ahorro de energías en la edificación?

1.2.- Justificación del proyecto.

El aumento de la población y desarrollo de las ciudades de forma acelerada, como se está dando en nuestros días, genera el crecimiento de la industria de la construcción y, por consiguiente, problemas e impacto ambiental; por tal motivo, es que esta investigación tiene el propósito de brindar una alternativa que ayude a minimizar los afectantes que genera este sector. . Primeramente, se tiene el problema ocasionado por la sobreexplotación de materiales, recursos naturales y materia prima, los cuales durante su producción pasan a través de un proceso de extracción, industrialización y traslados, que los convierte en tecnologías estimadas de alto consumo de energía.

Uno de los materiales de construcción más empleados en el mundo es el cemento, pero también es considerado como uno de los mayores productores de emisiones de CO₂, motivo por el cual se trabaja en ofrecer una propuesta de mortero que integre materiales que se obtengan a bajo costo energético, que puedan funcionar como aglutinantes y reemplazar al cemento en ciertas aplicaciones para disminuir su empleo.

Otro de los problemas a solucionar es el alto vertido de residuos que produce la industria y la construcción, por lo que se está considerando reutilizar materiales como el YD en forma de AN, la EAH y la MS, para formar un MC como mortero, donde se aprovecha las propiedades de estos materiales y se extiende su ciclo de vida, por consiguiente, se contribuye con una opción más ecoeficiente.

Hay estudios sobre el consumo energético en cada una de las fases de la construcción, por lo que se tiene identificado que en la etapa de operatividad y vida del edificio es donde se demanda un mayor consumo de energía como consecuencia a que se construye con materiales convencionales de baja eficiencia térmica que no cumplen con la función de resguardo ante las condiciones climáticas extremas, haciendo indispensable el acondicionamiento para el confort de los espacios interiores por medios mecánicos de enfriamiento, ventilación y calefacción, que pueden llegar a sumar hasta un 50% más del consumo de energía [31].

La estrategia de un aislamiento óptimo en la envolvente de los edificios puede llegar a conseguir beneficios directos de un 24 hasta un 52% en el ahorro de energías en algunas zonas climáticas [34], la rehabilitación energética de las construcciones por medio del aislamiento en muros externos, logran un ahorro de electricidad de un tercio del costo invertido para este fin, convirtiéndose en un proceso viable.

El mayor beneficio de esta investigación es lograr una tecnología pasiva para el aislamiento térmico, un MC de baja conductividad térmica adicionada por el AS, además de contribuir en el estudio de este material buscando solucionar los aspectos de baja compatibilidad a través de tratamientos químicos para modificar su energía superficial y con ello, lograr la resistencia adecuada del MC que permita emplearse como recubrimiento de muros en las envolventes de los edificios que son los elementos

donde se impactaría en mayor manera al ahorro y eficiencia energética.

1.3.- Hipótesis

Mediante el estudio de la dosificación, granulometría, modificación del AS, se conseguirá que el MC de residuos industriales de AN, EAH, MS y AS desarrolle condiciones físicas, químicas, térmicas y mecánicas necesarias para ser aprovechado como aislamiento para envolventes de la edificación, consiguiendo ahorro y eficiencia energética estimada por simulaciones, como una alternativa para aminorar el impacto al medio ambiente causado por la construcción.

1.4.- Objetivo General

Desarrollar un material de construcción alternativo de baja conductividad térmica, a través de la incorporación de partículas de AS al MC de naturaleza ecoeficiente, por estar conformado por residuos industriales como AN+EAH+MS, con propiedades físicas, mecánicas y térmicas, para aplicarse como aislamiento en las envolventes de la edificación, disminuyendo el consumo de energías por la climatización de espacios.

1.5.- Objetivos Específicos

1.- Determinar el efecto del tamaño de partícula de AS y el aditivo modificador de su energía superficial, que favorezcan las propiedades mecánicas y térmicas del MC, para que sea utilizado como material de aislamiento térmico.

2.- Analizar qué proporciones de AS y dosificación del aditivo modificador otorgan las mejores propiedades físicas, mecánicas y térmicas al MC, mejorando la compatibilidad del AS.

3.- Definir la aplicación constructiva del mortero que optimiza sus propiedades térmicas en las envolventes, a través de modelación y simulación energética obtenidas con el programa Designbuilder.

4.- Comparar el beneficio - costo del aislante térmico en cuanto al consumo y ahorro de energías, comparándolo con un sistema constructivo tradicional.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Marco Teórico

2.1 Cementantes alternativos.

En la mayor parte del mundo el uso de materiales adicionales al cemento, llamados también: cementantes suplementarios, componentes o aditivos minerales, adiciones cementosas, entre otros; aumentará con el propósito de ahorrar recursos naturales, conseguir nuevos tipos de concretos de alto rendimiento, con mejores cualidades como el aislamiento térmico y, sobre todo, con la finalidad de disminuir los impactos ambientales generados por la producción del cemento, que sobresale por consumir una cantidad importante de combustibles fósiles con base en Carbono, que liberan CO₂ a la atmósfera, generando el efecto invernadero y un elevado requerimiento de energía [35].

Se han realizado investigaciones reemplazando el cemento por materiales de desecho altamente reactivos, de baja energía empleada en su producción, sin que se reduzcan los requerimientos aceptados para las mezclas de pastas, morteros y concretos [36].

La industria del cemento tiene una gran influencia en el calentamiento global, por lo que se busca su reemplazo parcial o total en la construcción. Para su producción se requieren de 1480°C, mientras que para el yeso 170°C, por lo que se busca utilizar en mayor medida el sulfato de Calcio (CaSO₄), ya sea en forma de hemi-hidrato o anhidrita, que funcione como conglomerante en mezclas para concretos y morteros que puedan llegar alcanzar resistencias hasta de 30 MPa [27].

Otros materiales se han empleado en concretos, algunos de ellos considerados residuos que por su reutilización se califican como más ecológicos; en el caso de la EAH, se utiliza como reemplazo del cemento en concretos hasta en un 50%. También están las cenizas volantes, metacaolín, MS y puzolanas naturales, todos utilizados en la producción del cemento como aglutinantes para formar concretos, pero, además, se han aprovechado con otros cementantes, como la cal y el yeso, para formar concretos alternativos y morteros que son denominados cementos híbridos [27,37].

Estos cementantes brindan las mismas prestaciones tecnológicas que las mezclas hechas con cemento, pero muchas veces proporcionan mejoras en cuanto al rendimiento de los materiales, modificaciones en estados frescos, endurecidos, físicos, químicos, de hidratación [38], de durabilidad en ambientes agresivos y formando compuestos de mejores propiedades [39].

El problema de estos materiales está en su aceptación, implementación, comprensión de procesamiento, comportamiento químico y físico, parámetros de rendimientos, composición estandarizada y falta de regulaciones.

En la **Tabla 1.** se muestran algunas propiedades del cemento Portland, comparado con algunos cementos alternativos, mostrando las ventajas y las desventajas de su empleo.

Tabla 1. Comparación de cementos alternativos y cemento portland [40].

	Cemento Portland (OPC)	Cemento aluminato de calcio (CAC)	Cemento Sulfoaluminato de calcio	Cementante con activación alcalina	Cemento Super-sulfatado (SSC)
Principales fases/Materiales	C ₃ S	CA	C ₄ A ₃ S̄, C ₂ S, C S̄/C S̄ H ₂	Aluminosilicato, Alkali	Escoria, C S̄/C S̄ H ₂
Secundarias fases / Materiales	C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF, C S H ₂	C ₁₂ A ₇ , CA ₂ , C ₂ S, C ₂ AS, C ₄ AF	C ₄ AF, CA, C ₂ AS		Alkali/Portland cement
Hidratación	C-S-H, CH, Aft, Afm	CAH ₁₀ , C ₂ AH ₈ , C ₃ AH ₆ , AH ₃	Aft, AH ₃ , AFm, C ₂ ASH ₈ , C-S-H	Gel (N-A-S-(H)) y/o C-A-S-(H), zeolitas, hydrotalcita	Aft, C-S-H, Afm, Hydrotalcita
Temperatura de clinckerización	~1450 °C	N1450 °C	1250°C	Metacaolín: 800°C	N/A
Energía de Molienda (kWh/t)	30	>30	20	Escoria: 50	Escoria: 50
Ventajas	Historia	Resistencia en corto tiempo	Producción de baja energía	Bajo calor de reacción	Bajo calor de hidratación
	Compuestos estandarizados	Resistente a sulfatos	Rápida resistencia	Bajas emisiones de CO ₂	Durabilidad ambientes agresivos
		No tiene reacción alkali-silica	Compensación por compresión	Resistente al calor y ácidos	
		Resistente a la abrasión	Bajas emisiones de CO ₂		
Desventajas	Alta energía	Pérdida de resistencia	Durabilidad no definida	Lenta ganancia de resistencia	Lenta fuerza ganada
	Alta emisión CO ₂		Algunas veces se expande	Activación caústica	
	Límitada fuerza a edad temprana			Difícil reología	
	No resistente ambientes agresivos			Durabilidad no definida	

2.1.1 Clasificación, usos e interés de investigación de los cementantes alternativos.

En algunos, países los subproductos generados por la industria que regularmente tienen como primera y única opción los vertederos, están siendo aprovechados como ejemplo de un proceso circular y eficiente de recursos [41], acompañado de políticas de reutilización y reciclaje que conduce al desarrollo de nuevas tecnologías, sobre todo en materiales de construcción.

Se tienen identificados cuatro tipos de aglutinantes como alternativas del cemento portland: 1) los cementos super sulfatados, 2) los aluminatos de Calcio, 3) sulfo-aluminatos de Calcio y 4) Aglutinantes activados con álcalis, todos estudiados para conocer sus composiciones, mecanismos de reacción [40], beneficios y desventajas.

1) Los llamados cementos super sulfatados (SSC), sulfo siderúrgicos, siderúrgicos -super sulfatados o Cementos de alto Horno, como se les conoce en Norte América, se ha regularizado su empleo por normativas en varios países.

Estos cementos alternativos están compuestos con materiales minerales que, en su composición o mezclados, alcanzan a obtener los mismos componentes químicos que el cemento Portland, por lo que se están utilizando como cementantes alternativos, sustituyendo al cemento en diversas aplicaciones.

Estos aglutinantes son ecológicos de muy bajas emisiones de CO₂ [36], nombrados eco-cementos y cementos próximos a Carbono cero [42]. Tienen como propiedades ser muy resistentes a los sulfatos y a los ataques químicos, baja permeabilidad por su microestructura densa y compacta, con resistencia a

la micro fracturación, por presentar menores temperaturas durante su fraguado, buena durabilidad, resistencia a la carbonatación y son una alternativa de química verde sostenible que permite actualmente comercializarlos [36,42].

Estos cementos están compuestos por subproductos industriales reciclados, siendo más del 70% EAH, yeso regularmente activado con calor y cemento Portland que se comporta como un activador alcalino, alcanzando resistencias hasta de 32.50 N [41]. Por tal motivo son aprovechados para producir pastas y concretos para diversos usos como estructuras con exposiciones ambientales severas en puertos, establos [40,43] y en aplicaciones industriales.

Como una característica de estos cementantes es que endurecen lentamente, la relación agua- aglutinante (W/B) se ha estandarizado en 0.40 en la EN15743 y la norma francesa NFP15-313, mientras la EN196 sugiere 0.50; la relación de masa para estos morteros establece la relación aglutinante/arena en 1/3, de acuerdo con las características de los estándares para los SSC [43].

Este tipo de cemento se obtiene integrando EAH granulada molida >80% ó del 70-90% [41], con un alto contenido de $\text{CaO}+\text{MgO}$ y Al_2O_3 al menos 14-15% [42]. El MgO no debe ser superior al 9% [36], debe contener Sulfato de Calcio como yeso, AN o hemi-hidrato de un 10-20%, aunque se tiene registrado en la bibliografía el uso de fosfo - yeso, fluoro-anhidrita y yeso de desulfuración [40]. Por último, se establece <5% de Clinker o cemento Portland que tiene la función de reactivar a la EAH [44].

Otros activadores utilizados son el hidróxido de Calcio, hidróxido de Potasio y carbonato de Sodio, debiéndose cuidar el no sobrepasar su empleo,

pues causa pérdida de resistencia, impacto negativo a la estabilidad del volumen y reacciones expansivas relacionadas con la formación de etringita [40]. Para la buena trabajabilidad de la mezcla es recomendable considerar el agua para aglutinar con una relación agua aglutinante (W/B) de 0.40, que han permitido obtener resultados de 48.2 a 50.7 MPa a los 28 días [42].

En la **Tabla 2.** se manifiesta que las escorias más idóneas para fabricar los cementos súper sulfatados son las aluminosas y, al mismo tiempo, las cálcicas dentro de todas ellas. La mayor eficacia de una escoria para ser utilizada depende de su composición; debe satisfacer los índices de basicidad y tener un mínimo de poder hidráulico propiedad que es conocida como hidráulicidad. Estos valores son obtenidos a través de la relación de su misma composición química y sus componentes minoritarios que determinan su comportamiento [45], tema que se describe más adelante.

2) Los cementos de aluminato de Calcio contienen principalmente aluminato mono-calcio ($C_{12}A_7$ o CA_2), pueden contener cantidades de sílice como gehlenita (C_2S y/o C_2AS), además de ferrita (C_4AF) que debe contener una relación variable entre Aluminio-Hierro A/F superior al 50% [44].

Este tipo de cementante se obtiene por la combinación de alúmina, cal, óxido de Hierro y Sílice. Se considera dentro de la familia de los aglomerantes hidráulicos, ya que tienen la característica de reaccionar y endurecer con el agua. Se comenzaron a utilizar desde 1900 en Francia, con la finalidad de resistir las afectaciones ocasionadas por los sulfatos. Las ventajas sobre el cemento Portland es la fuerza que adquiere en poco tiempo, presentando endurecimiento

rápido y resistencia mejorada a la abrasión, ataques de sulfatos y reacciones álcali-sílice.

Tabla 2. Porcentajes de componentes de Cementos Supersulfatados Normados en diferentes países [36].

No.	Bélgica			Alemania	Reino Unido				
	305	558	586	550	335	585	613	628	629
CaO	45.41	44.71	44.45	41.4	45.23	41.52	41.01	41.67	42.26
SiO₂	27	25.88	28.56	25.47	24.4	30.52	28.89	30.39	29.74
Al₂O₃	11.93	11.86	12.38	13.3	13.04	13.79	13.85	14.04	13.74
Fe₂O₃	1.07	0.8	0.95	0.54	0.64	1.18	0.93	0.81	0.83
Mn₂O₃	1.18	0.76	0.81	0.73	0.75	1.18	0.95	1.01	1.08
TiO₂	0.5	0.48	0.6	0.83	0.57	0.56	0.52	0.48	0.51
MgO	2.61	3.63	3.69	6.75	3.34	3.75	3.64	3.56	3.38
Na₂O	0.34	0.29	0.42	0.63	0.47	0.27	0.28	0.33	0.34
K₂O	0.75	0.54	0.52	0.65	0.79	1.03	1.14	1.06	1.08
SO₃	6.72	7.8	5.65	8.53	7.57	5.29	5.76	5.04	5.37
S (sulfuros)	0.84	0.96	0.98	1.41	1.07	0.98	0.98	1.01	1
P₂O₅	-	0.25	0.32	0.1	-	0.09	-	-	-
Pérdida por Ignición	1	0.22	0.14	0.49	2.35	0.17	*0.85	*1.36	*1.23
Total (%)	98.93	97.7	98.98	100.13	99.69	99.84	98.95	100.4	99.33

* Valores de ganancia

Este tipo de cementantes tienen mejores propiedades de durabilidad, comparado con otros aglutinantes cementosos. Se emplean en refractarios y construcciones con actividades químicas, genera emisiones bajas de CO₂, pero su empleo tiene dos problemas, uno es el proceso de transformación que presentan al hidratarse con el tiempo, su característica metaestable se convierte en estable, aumentando la porosidad y disminución de fuerza; el segundo problema, es el costo elevado, comparado con el cemento Portland, resultado por el suministro limitado de la bauxita principal fuente de alúmina [44];

Actualmente se tiene el interés de resolver estos problemas y la técnica para el uso de este cementante alternativo.

La composición del cemento aluminato de Calcio (CAC) en porcentajes respecto a su masa se muestran en la **Tabla 3.**; donde Bizzozero señala que el contenido es CaO (40.2%) =C, Al₂O₃ (39.0%) =A, Fe₂O₃ (11.7%) =F, FeO (4.3%), SiO₂ (1.9%) =S y algunos otros elementos en menor porcentaje [46]. Se muestra que estos cementos cuentan con una química totalmente diferente a la del cemento Portland, como se muestra en la **Tabla 4.** así como las fases mineralógicas en la **Tabla 5,** señalando que el principal mineral es la fase de aluminato mono -cálcico CaAl₂O₄, además de las diferencias en las proporciones de los otros minerales o fases **Tabla 6 y Figura 7.**

Se ha utilizado en mezclas ternarias compuestas con cementos de Calcio, aluminatos, sulfato de Calcio y piedra caliza, ampliamente utilizados por sus propiedades especiales, como el fraguado y la obtención de resistencias de compresión y contracción en poco tiempo, motivos que justifican su aplicación [44].

Tabla 3. Porcentajes de componentes químicos del Cemento Aluminato de Calcio. Información basada en: Bizzozero et al. [46], Ukrainczyk et al. [47] y Matusinovic et al. [48].

Composición del Cemento Aluminato de Calcio (CAC)												
Autor	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Otros	Sum
Ukrainczyk	37.1	38.47	14.39	2.9	4.43	1.05	0.9	0.2	0.14	0.17	0.25	100
Matusinovic	36.6	40.3	16.3		4.1	1.8	0.1	0.3	0	0	0.5	100
Bizzozero	40.2	39	11.7		1.9						7.2	100

Tabla 4. Comparación de principales componentes químicos del cemento Portland y cementos aluminosos [35].

	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Cemento Portland	21	63	4	3	0.2	0.5-1.0	2.5-3.5
Cementos aluminosos	5	40	40	15	-	-	-

Tabla 5. Contenido de minerales en cementos de aluminato de calcio, información retomada de: Bizzozero et al. [46].

wt.%	Aluminato monocalcico	Ferrita	Gehlenita	Belita	Perovskita		
	CA (Ca Al ₂ O ₄)	C ₄ AF (Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃)	C ₂ AS	C ₂ S	Fe ₃ O ₄	CFT	Otras
Bizzozero	50.7	10.9	12.3	4.6	6.3	10	5.2

Tabla 6. Comparación de principales componentes minerales del cemento Portland y cementos aluminosos [35].

	Portland		Aluminosos	
Componentes esenciales	C ₃ S	50–60 %	CA	60%
	C ₂ S	10–30 %		
Otros componentes	C ₃ A	0–10 %	C ₂ S	10%
	C ₄ AF	5–15 %	C ₂ AS (gehlenite)	5–20 %
Componentes menores	CaO	1–2 %	C ₁₂ A ₇	5–20 %
	Periclase	1–2 %	FeO	
	Sulfatos alkalis	1–2 %	Ferrita	
			Pleocerita	

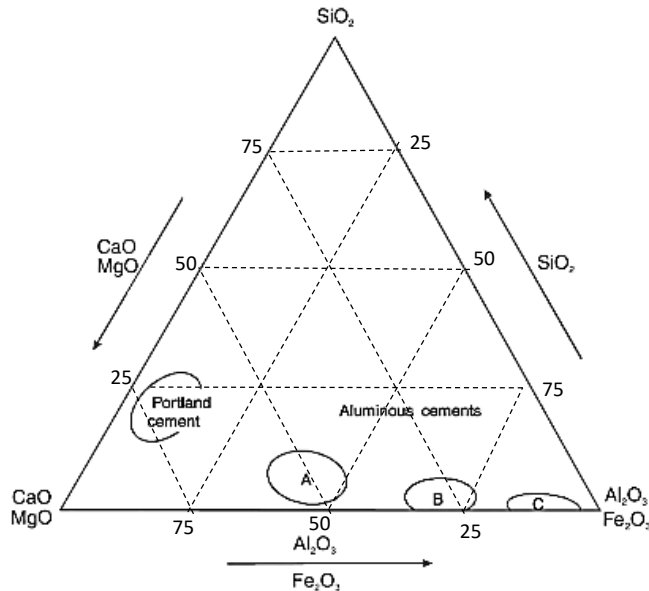


Figura 7. Composición del Cemento Portland y los Cementos aluminosos; A) Contenido bajo en alúmina, B) Contenido Medio y C) Alto contenido de alúmina [35].

3) El Sulfo-aluminato de Calcio (CSA) desarrollado en China en 1975 [49], se ha investigado con mayor actividad en las últimas décadas, descubriendo que tiene propiedades aglutinantes como los cementos hidráulicos, con la diferencia de que no forma hidrato de silicato de Calcio (C-S-H), sino etringita [35]. Se produce al calcinar aproximadamente a 1250°C el yeso (fuente de azufre), bauxita (fuente de Aluminio) y piedra caliza (fuente de Calcio); por lo tanto, se produce con temperatura más baja que la utilizada para obtener el Clinker del cemento Portland (~1450°C); además, la demanda menor de caliza (35 a 40%) reduce la huella de Carbono del material [49-50].

Al producir 1t de Clinker CSA, reduce un tercio de las emisiones totales en comparación a las del OPC [49]; es un material considerado ecológico, con ventajas ambientales por su producción basada en la utilización de diversos desechos industriales o subproductos como el fosfoyeso, ceniza de carbón y escoria de alto horno, que reducen el tiempo de la temperatura y el tiempo de calcinación.

Puede ser producido en hornos rotatorios como los que se utilizan para el Cemento Portland [51]. Su principal fase de este tipo de cementante es la gemelita (C_4A_3S), las fases secundarias la belita (C_2S) y sulfato de Calcio - gemelita (C_2AS); cada una contribuyendo con diversas cualidades como el ganar resistencia a edades tempranas y a largo plazo respectivamente [50], alcanzando propiedades como tiempo de fraguado corto, alta dureza, impermeabilidad, resistencia a la corrosión por sulfatos y cloruros, además de presentar baja alcalinidad [52].

Actualmente se emplea en la mejora de suelos y aplicaciones geotécnicas, al mezclarse con arena alcanza resistencias altas, fraguando con rapidez y reduciendo el período de construcción [49]. Se ha logrado mejorar la durabilidad del CPO a través de la sustitución parcial o total del cemento por este ligante alternativo, el cual se encuentra compuesto por Clinker sulfo-aluminoso (77%), sulfato de Calcio anhidro (18%) y caliza (5%). Sus principales productos de hidratación son la etringita, el hidrato de mono -sulfoaluminato de Calcio, gibbsita ($Al(OH)_3$) y el hidrato de silicato de Calcio (C-S-H) [53].

El CSA está considerado como cemento de alto rendimiento, con altas resistencias tempranas y tardías [35], consiguiendo hasta 40 MPa a las 6 h y superiores a 55 MPa a las 24 h [54]. Su valoración de ahorro energético y emisión de CO_2 es positivo, por la temperatura de sinterización, molienda de materias primas que le permiten obtener ahorros hasta del 33%, presenta durabilidad a ambientes marinos salinos y protege al acero que se integra como refuerzo del concreto [51]. Se ha aplicado en la producción de elementos de concreto auto-tensado para tuberías, por sus propiedades expansivas [54], autonivelantes, morteros de fraguado rápido y productos para clima frío [35].

4) Aglutinantes activados con álcalis.

Los aglutinantes son todas aquellas sustancias que al combinarse con otros materiales tienen la propiedad de unirlos, constituyendo un nuevo producto o sustancia que puede ser moldeada, adherirse fácilmente a otros materiales o unirse entre sí, para conseguir endurecerse y alcanzar resistencias mecánicas al paso de un determinado tiempo. Se pueden clasificar en conglomerantes cuando

se producen reacciones químicas como el cemento, yeso, cal, entre otros; y los aglomerantes que unen los materiales por medio de un proceso físico como el barro [55].

El proceso de activación alcalina se realiza a través de reactivos o precursores que generalmente son subproductos, residuos o desechos industriales como: cenizas volantes pulverizadas, desechos puzolánicos, Metacaolín (arcilla calcinada), cenizas de combustible de aceite de palma, escorias granuladas de alto horno, polvo de vidrio, caolín, ceniza de cáscara de arroz, humo de Sílice y residuos de construcción ricos en Sílice amorfa y alúmina. Se recomienda para mejorar los resultados de la activación, someterlos a un tratamiento térmico para reducir la cantidad de agua de cristalización y crear una estructura amorfa que los hace más reactivos [56-57].

Actualmente se buscan aglutinantes de baja huella de Carbono que reduzcan la generación de CO₂ y la utilización de recursos naturales reutilizando, revalorando los desechos o residuos como alternativa de economía circular [57], sobre todo con una gran capacidad como para reemplazar al cemento [56].

Estos precursores son activados por medio de materiales álcalis (activadores), que se sintetizan en entornos de acidez (pH) muy alto, como los basados en Sodio o Potasio, tales como: los silicatos de Sodio, hidróxido de Sodio, silicatos de Potasio e hidróxido de potasio [56], óxidos, hidróxidos y carbonatos que están compuestos por metales alcalinos como el Litio, Sodio, Potasio, Rubidio, Cesio y Francio, que son químicamente activos, blandos, que generalmente pueden aparecer en forma de sales [58]. Regularmente estos

materiales son utilizados como bases fuertes y muy hidrosolubles, son muy corrosivos y pueden llegar a quemar la piel como los ácidos [59].

Se ha reportado sobre los beneficios de los aglutinantes activados por álcalis para estabilizar suelos, que han conseguido beneficios en la resistencia y expansiones [57]; el caolín calcinado con amplio intervalo de contenido de Al_2O_3 (28.69% en peso) con alto porcentaje de puzolana, alcanza resistencias de 15-40 MPa a los 90 días y se ha definido que los resultados con mejores valores a compresión, se han dado cuando el contenido de Fe y Al es menor, pues estos componentes reducen la resistencia a la compresión del aglutinante activado [60].

Algunas experimentaciones se han realizado con materiales alcalinos activados para estabilizar arcilla arenosa utilizando escoria de alto horno activada con Hidróxido de Sodio, obteniéndose mejor cohesión y resistencia; en cuanto a estudios de algunas categorías de impacto al medio ambiente y ciclo de vida, se determina que para estos materiales se definió que la producción de los activadores alcalinos son el punto crítico ambiental, confirmándose también que estos tipos de aglutinantes son alternativas ecológicas menos perjudiciales que el cemento, sin comprometer el rendimiento de los elementos constructivos [56].

Las características de los aglutinantes activados con álcalis son esenciales en las propiedades de los concretos, considerando el mejoramiento de la resistencia, endurecimiento, comportamiento de contracción, durabilidad a largo plazo y cualidades mecánicas. Actualmente los sistemas de Escoria de alto horno y las cenizas volantes, son activados con hidróxido de Sodio, silicato de

Sodio y el carbonato de Sodio, los activadores alcalinos más utilizados y con mayor frecuencia en estos sistemas [61], además de ser considerados de gran ventaja y los más prometedores debido a que se han obtenido productos de alto rendimiento que se estudian para buscar su optimización [61].

2.1.2 Cementantes Suplementarios.

Se definen como todos aquellos materiales que se mezclan con cementantes para conseguir conglomerantes hidráulicos, aglutinantes que se endurecen con el agua, y que pueden ser agregados secundarios hasta en un 5% del compuesto, aditivos o productos para modificar las características esenciales del cemento como: clinker, escoria, humo de Sílice, puzolanas naturales, puzolanas químicas, cenizas volantes, arcillas calcinadas, piedra caliza y rellenos. Los primeros concretos fueron hechos con cal, materiales cementosos naturales y arcillas calcinadas; en el siglo XX se comenzó a usar la EAH para mezclarse con el cemento Portland.

Estos materiales son clasificados en tres grupos: las escorias industriales de alto horno, subproducto en la fabricación del arrabio, granulada, templada, vítrea y granulada de alto horno molida, Las puzolanas que son subproductos industriales o naturales que tienen cierto porcentaje de Sílice vítreo amorfo que reacciona a temperatura ambiente con la cal, produciendo la hidratación C_3S (Silicato tricálcico $3CaO.SiO_2$ llamada Alita) y C_2S (Silicato Bi cálcico $2CaO.SiO_2$ conocida como belita) para formar el C-S-H [35].

La ASTM C618 define a estos materiales como silíceos o silíceos-aluminosos que por sí solos no presentan ningún valor [62], pero en presencia de humedad reaccionan químicamente con hidróxido de Calcio originando compuestos con propiedades cementosas que mejoran las cualidades, calidad del concreto y pastas [63]. Se puede decir que la reacción puzolánica se puede representar de la siguiente manera: puzolana + portlandita = Silicato de Calcio Hidratado y cuando se hidrata el cemento sería cemento Portland + puzolana + agua = C-S-H + sulfo-aluminatos [63].

2.1.3 Cementantes con base en Sulfato de Calcio.

El yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y la AN (CaSO_4) se encuentran en grandes cantidades sobre la corteza terrestre, son considerados como materiales de construcción de proceso simple y son reconocidos por su propiedad de aglutinar, por lo tanto, se les considera como cementantes hidráulicos.

En un principio se utilizó el yeso como pasta para unir piezas de piedra, su empleo data de tiempos muy remotos [35], en construcciones en Catal Hüyük (7000 a.C.), en la antigua Anatolia (Turquía), Cisjordania (6900 a. C.), Mesopotamia e Irán (5000 a.C.), Egipto (2000 a. C) [25], Roma, Creta, Grecia entre otros, luego se retomó en catedrales, monasterios, haciéndose uno de los materiales más empleados durante el Barroco, hasta nuestros días [35].

El empleo del yeso en la construcción ha sido gracias a su gran disponibilidad y la materia prima para su fabricación. Se puede encontrar en forma natural sobre todo en lugares donde se formaron sales por la evaporación

de agua [35]. Actualmente se obtiene también en forma sintética a través de procesos químicos que se producen para obtener el ácido fluorhídrico. Sus ventajas son sus mismas propiedades como facilidad de moldeo, ligereza, estética, aislante térmico y acústico, se adhiere a materiales con superficies porosas, su fraguado se obtiene en pocos minutos, pero también su puede regular con aditivos, resiste al fuego, su costo de obtención es relativamente bajo [25,64], además de que su aplicación es sencilla.

Es un material versátil, pues mezclado con diversos agregados y aditivos, se pueden lograr muy diversos productos de características y aplicaciones variadas; por ejemplo: de forma húmeda en morteros y pastas se utilizan como revestimientos de muros y cielos, en condiciones secas, se emplean en la fabricación de placas, molduras, cerámicas y ladrillos. Actualmente la producción de paneles de yeso de 12.5 a 6 mm puede automatizarse con facilidad en plantas modernas para producirlas a una velocidad de 15 km/h en una línea de 300 m endureciendo en minutos [25].

La roca sedimentaria llamada piedra de yeso es la materia prima de donde, a través de diversas temperaturas y fases, se obtiene el yeso. Esta roca está compuesta por sulfato de Calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con algunas impurezas y algunos porcentajes de AN. El yeso comercial es la fase hemihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) que se obtiene a bajas temperaturas que oscilan entre 100 a 130°C, el cual, al agregarle agua, recupera las moléculas pérdidas de este líquido para volverse a convertir en dihidrato. Esta propiedad y ciclo, es el que le permite ser totalmente reciclable [64].

Las cinco fases que se reconocen del sulfato de Calcio se pueden encontrar a temperatura ambiente, y son: el **dihidrato** que contiene las dos moléculas de agua y es el más estable; el **hemihidrato** con media molécula, la **anhidrita III** que se obtiene con calcinaciones a temperaturas que oscilan entre 120 a 300°C y sigue siendo soluble; la **Anhidrita II** se obtiene en temperaturas de 300 a 700°C, convirtiéndose en un material estable que presenta buenas resistencias mecánicas, de alta densidad, con una estructura hexagonal estable, insoluble, inerte, por lo que requiere de un activante para obtener regularmente una reactividad lenta con el agua y cuenta, además, con una mayor densidad de empaquetamiento molecular. La última fase conocida como **Anhidrita I** se obtiene a 1180°C [25], pero al enfriarse se convierte en Anhidrita II, por lo que no es atractivo su empleo.

La mayor parte de yeso producido en la industria de la construcción, sector donde se genera gran cantidad de desecho, tiene como destino final los vertederos que no son controlados y alteran las propiedades y alcalinidad del suelo, contaminan los mantos freáticos ocasionando impactos medioambientales negativos. Actualmente se está obteniendo sulfato de calcio mediante diversas técnicas, además de reciclar y reutilizar los desechos de yeso y AN, como se propone en esta investigación [64]. Los compuestos elaborados con una matriz conformada por yeso se pueden mejorar, reemplazándolo por una variedad de residuos como: cerámica, concreto, vidrio, desechos de carpintería, plásticos, diferentes residuos de construcción y demolición con diferentes porcentajes, además de incorporar algunos aditivos como retardantes del fraguado [65].

Se ha experimentado la matriz de yeso con materiales de relleno aligerados como: arena de sílice, perlita, arcilla expandida y espuma de poliuretano. Se encontró que estos materiales afectan la forma y los cristales del yeso, observándose que los cristales más grandes se forman con partículas no porosas y entre más rugosa sea su superficie se vuelve más resistente. El mejor resultado fue con arcilla expandida, mientras que con poliuretano alcanzó 2.9 MPa a los 7 días y su mejor conductividad térmica fue de 0.211 W/mK, logrando un mejoramiento en las propiedades del yeso [66]. Algunas investigaciones han demostrado que los morteros con base en yeso tienen mejor estabilidad que los compuestos de yeso y arena [67].

2.1.4 Cementantes con base en escoria de alto horno (EAH).

La ASTM C989 menciona que la EAH es un producto no metálico compuesto esencialmente por silicatos (SiO_2) y aluminosilicatos (Al_2O_3) de Calcio y otras bases que se desarrollan simultáneamente con Hierro en un alto horno [68]. Se obtiene en gránulos de material vítreo, que forman la escoria que rápidamente es enfriada por medio de su inmersión en agua, mientras el alto horno está fundiendo [49]. Gracias al progreso y al desarrollo mundial del acero, la producción de EAH ha aumentado exponencialmente, al ser un subproducto que se obtiene durante la producción del arrabio [69]. Se considera que se generan aproximadamente 300 kg por cada tonelada de arrabio [70]. Esto hace estimar que aproximadamente se producen de 300 a 360 millones de toneladas de escoria en todo el mundo [69].

Su reutilización tendría como objetivos evitar la contaminación del medio ambiente, pero también aprovechar un material con propiedades invaluableles. Se han desarrollado investigaciones que proponen reciclarlo y han obtenido resultados exitosos, por ejemplo: se han producido algunas mezclas donde se ha superado 80% del porcentaje de utilización y reemplazo por cemento [34]. Se ha logrado su activación química con cemento para ser el aglutinante principal en mezclas [70]. Se ha utilizado como material de relleno en carreteras, como aditivo en producción del cemento, vidrio y en materiales de aislamiento térmico, por sus componentes cerámicos como SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO y MgAl_2O_4 [34].

La EAH contiene en su composición los mismos elementos esenciales que el cemento, pero en diferentes proporciones, que le dan menos reactividad hidráulica y, por lo tanto, menor resistencia mecánica a diferentes edades, **Figura 8**.

La escoria no es un material aglutinante, ni una puzolana, por lo que al mezclarla con agua no endurece y no se combina. Para obtener sus propiedades hidráulicas es necesario agregarle activantes que se encargan de formar un proceso químico que se denomina activación alcalina, que es como formar una capa de gel o ácido que ayuda a la reacción C-S-H. La EAH apagada sólo muestra propiedades hidráulicas cuando se activa con el cemento Portland y sus tres componentes esenciales, cal, sulfato de calcio y álcalis, que le permiten alcanzar resistencias menores que las del cemento a edades tempranas, pero a los 28 días logra propiedades mecánicas iguales o superiores [33].

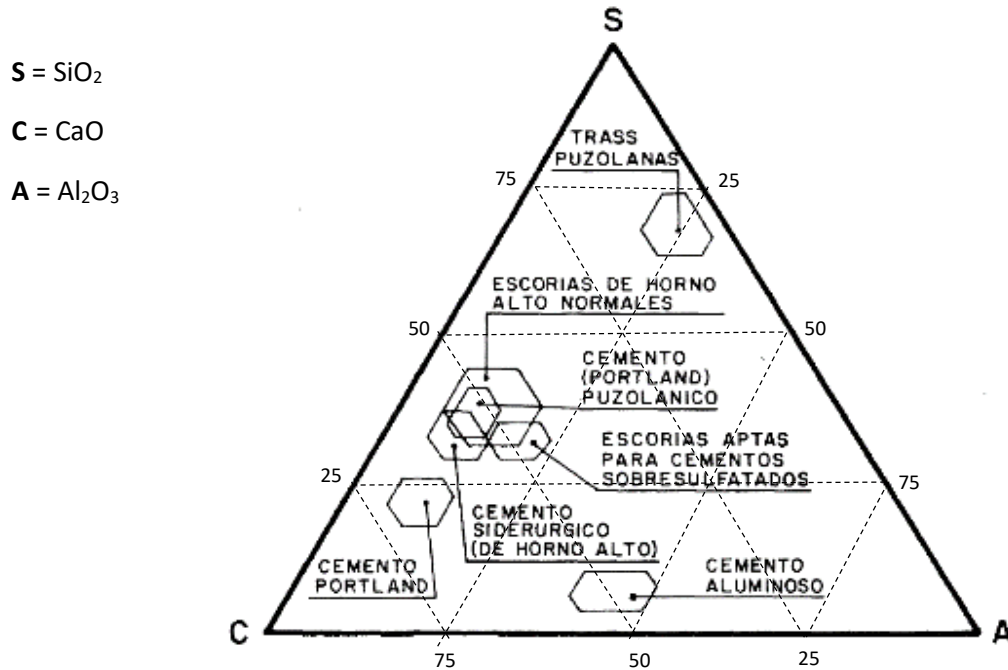


Figura 8. Diagrama Triangular (C-S-A) de RANKIN donde se muestra los diferentes tipos de escorias, su composición con respecto a otros tipos de cementantes y cemento Portland [45].

Su aplicación como agregado del concreto, data desde 1900, cuando se añadía escoria molida como material cementoso, utilizando hasta un 90% menos de energía, en comparación con la que se necesita para moler el cemento. Este material reemplaza al cemento en una proporción del 30 a 85%, pero el 50% es el más usado generalmente. Otro de los motivos para utilizar la EAH es que el concreto absorbe grandes cantidades de materiales vírgenes. Por cada tonelada de concreto se necesita una tonelada y media de recursos naturales y hasta el momento sólo una pequeña parte de escoria se reutiliza para este fin [69]. Algunas investigaciones han trabajado en concretos hechos con escoria, mezclando Clinker y sulfato de Calcio, para obtener los llamados cementos súper sulfatados, que presentan las mismas condiciones y resistencias al concreto de

cemento, pero con algunas cualidades, como ser resistentes a los sulfatos y a los ácidos [35].

En algunos países ya han normado la mezcla de escoria en los concretos y se manejan varios niveles de sustitución, del 6 al 20%, del 21 al 35%, del 36 al 65%, del 66 al 80% y, por último, del 81 al 95%; estos últimos llamados cementos de alto horno o super sulfatados, siendo parte de mezclas estandarizadas ternarias o hasta cuaternarias con escorias. En lo que respecta a la incorporación en el cemento Portland, se manejan de un 20 a 39% y de un 40 a 64%. En Norteamérica se tienen estandarizados tres tipos de cementos, donde se incluyen escorias como la clase 80, 100 y 120, establecida en la ASTM C980 [35].

Otros requerimientos físicos establecidos en la Norma ASTM C989 son: la finura recomendada, es del 20% de cantidad máxima retenida en 45 μm tamizada en húmedo, que es equivalente a la malla No. 325, como especifica la ASTM C430 [71]. Se permite agregar sulfato de Calcio (CaSO_4) a los cementos elaborados con escoria, siempre que se demuestre que la mezcla no desarrolle expansión por causa del agua, que exceda a 0.02% a los 14 días [68]. Se recomienda que el contenido de aire en el mortero de escoria no sea mayor que el 12%. Los requerimientos químicos sugieren que el máximo de Azufre (S) sea de 2.5 % [68], condición que no es detectable por fluorescencia de rayos X.

Además del tamaño de la partícula o finura de la EAH, se caracterizará su composición química para determinar la cantidad de cada elemento químico que contiene y determinar sus propiedades, como el índice de basicidad y de hidraulicidad que, junto al estudio de índice de fracción amorfa, permite

establecer su reactividad, su reacción en la composición del mortero y su utilidad en el mismo [25], **Tabla 7 y Figura 9.**

Tabla 7. Porcentajes de componentes químicos de EAH [35].

Fuente	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	S
Reino Unido	40	35	16	6	0.8	0.6	1.7
Canada	40	37	8	10	1.2	0.7	2
Francia	43	35	12	8	2	0.5	0.9
Alemania	42	35	12	7	0.3	0.8	1.6
Japón	43	34	16	5	0.5	0.6	0.9
Rusia	39	34	14	9	1.3	1.1	1.1
Sur Africa	34	33	16	14	1.7	0.5	1
Estados Unidos	41	34	10	11	8	0.5	1.3

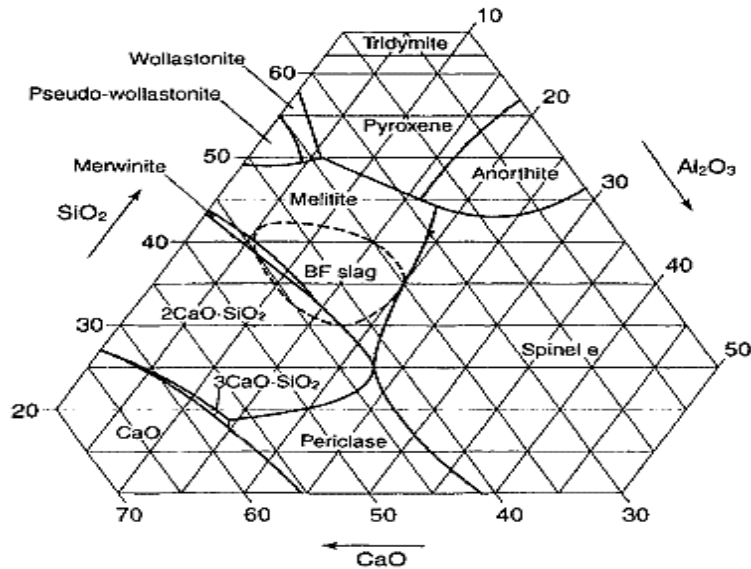


Figura 9. Cementos hechos con EAH en diagramas ternarios [35].

2.1.5 Cementantes con base en microsílíce (MS).

La microsílíce también conocida como humo de Sílice, está dentro de la familia de las puzolanas. Por su naturaleza se considera puzolana artificial, material cementoso, hidráulico, utilizado para concretos que contienen cierto porcentaje de Sílice vítreo. Es un material amorfo, compuesto en su mayoría de

Sílice o alúmina que reacciona en temperatura ambiente con la cal y produce la hidratación C_3S y C_2S , para provocar la reacción C-S-H.

Cuando se presenta humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de Calcio, para formar compuestos con propiedades cementantes. Este material mejora la calidad del cemento, la pasta, los morteros y concretos, dando mayor durabilidad y resistencia a agentes externos, por estar compuesto por finas partículas 100 veces más pequeñas que las del cemento y es muy reactiva [35]. El proceso de hidratación provocado por la reacción puzolánica del humo de Sílice es más lento que la del cemento Portland, pero se obtiene mayor resistencia y mejor permeabilidad [35].

El humo de Sílice es un subproducto obtenido en la fabricación de metal de Silicio, ferrosilicio, aleaciones y fabricación de Zirconio. Se produce a través de hornos de arco eléctrico donde se transforma el Silicio en cuarzo (SiO_2) en estado metálico (Si). Durante este proceso se despiden vapores dentro del horno, los cuales se escapan por la parte superior y, al entrar en contacto con el aire, se origina su oxidación, formando partículas finas vítreas de SiO_2 que se recogen en sistemas de recolección y eliminación de polvos.

El tamaño de las partículas del humo de Sílice es de $0.1 \mu m$, por lo que su utilización en mezclas ayuda a la densificación como un efecto de relleno. Las partículas presentan un color gris oscuro ligero, dependiendo del porcentaje de Carbono y Hierro que contengan, el área superficial varía en un intervalo de 10,000 a 25,000 m^2/kg de 6 a 10 veces del área del cemento. Cuando se mezcla con el cemento se puede apreciar, mediante un difractograma de rayos X, el

proceso de hidratación., En un inicio, el pico de portlandita está presente, pero luego reacciona desapareciendo para formar la C-S-H. El empleo de este material en los concretos beneficia la hidratación, la pasta se vuelve más masiva y las interfaces entre los materiales o agregados gruesos se compacta y mejora la compatibilización, por el tamaño de su partícula permite que ocupe vacíos que normalmente presentan las pastas logrando densificación, con menor porosidad, permeabilidad, mayor resistencia y durabilidad [35].

El humo de Sílice se comercializa con densidades de 300 a 500 kg/m³, y junto al cemento forma cementantes binarios, ternarios (cemento, 5% MS y 5% cenizas volantes o EAH) o cuaternarios (cemento, cenizas volantes, MS y EAH), compuestos que actualmente se comercializan. Por su alto costo es que sólo se utiliza en concretos, pastas o morteros para alcanzar rendimientos mayores o cuando el concreto se expone a condiciones ambientales que lo puedan afectar [35]. La adición del humo de Sílice en concretos como reemplazo del cemento, trae consigo el mejoramiento de flujo del asentamiento de material debido al efecto del tamaño de las partículas de MS. Un porcentaje mayor de reemplazo aumenta la trabajabilidad de la mezcla, sobre todo por el aumento del área superficial.

La proporción de adición puede variar con respecto al aglutinante y la demanda de agua, comprobando que mejora su propiedad mecánica como la compresión, la tracción y la flexión. El porcentaje para usarse como reemplazo del cemento puede variar de un 10, 15 y 20%, pero no se recomienda por sus

componentes, que se agregue más del 20%, ya que disminuye la resistencia del concreto [72].

La ASTM C1240 señala los requerimientos químicos: la MS debe contener 85% mínimo de SiO₂, contenido de humedad 3.0 % máximo y pérdida por ignición de 6.0% máximo. En cuanto a los requerimientos físicos, se tiene que el porcentaje máximo retenido sobre 45 µm (No.325) es de 10% y que esto puede variar hasta un 5% de puntos porcentuales. El índice de actividad puzolánica debe ser acelerado con cemento Portland, a 7 días, área específica mínima de 15 m²/g y como recomendación para su inclusión, es utilizarlo a un 10% del peso del cemento o aglutinantes [73].

2.1.6 Multi -compuesto AN+EAH+MS como mortero alternativo.

Para esta investigación se retomó un mortero ternario estudiado con anterioridad por *Guerra-Cossío (2016)* [27], formado por YD en fase de AN calcinada a 500°C para alcanzar mayor resistencia por arriba de la del hemidrato comercial, que alcanza los 4 MPa. Este material se activó con 3% de Sulfato de Potasio y 4% de hidróxido de Calcio, que cubre la función de aglutinante junto al agregado inerte de EAH que es activada con 7% de cemento y la MS que se integra como activador para conseguir dureza y mayor resistencia. La propiedad que también se evalúa es la conductividad térmica que será obtenida a través del agregado AS.

El mortero que contiene arena Sílica y agua en proporción de 0.45 (agua/ aglutinante) presentó una resistencia a la compresión aproximada de 20 MPa a

la edad de 56 días, comparado con otros compuestos de AN, que han alcanzado hasta 30 MPa [35]. Su conductividad térmica se determinó en 0.261 W/mK a través de un proceso de aireado [26,74], por lo que el autor reconoce que el material puede ser una alternativa para la construcción de elementos constructivos como mamposterías o bien otros elementos de bajo requerimiento mecánico [27].

Los beneficios del mortero son: menor impacto ambiental por la reutilización de materiales de desecho industrial como la EAH, MS y sobre todo la AN que tiene un mayor porcentaje 70% en la composición del compuesto, además de que se produce con menos energía de un 24 a 33%, en comparación con la obtención del Clinker para el cemento portland [27]. Por lo tanto, se evaluaron en esta investigación las propiedades térmicas para determinar el ahorro de energía que se consigue al aplicarlo en las envolventes de los edificios.

2.2 Aislamiento térmico en las edificaciones.

El aislamiento térmico son los materiales o la combinación de varios, que tienen la característica de retardar el flujo de calor por conducción, convección y radiación, debido a su alta resistencia térmica dentro y fuera de un edificio [75]. Es primordial para que las construcciones sean más eficientes energéticamente, considerar las condiciones de climas extremos, tanto cálidos como fríos [76], la radiación solar, la temperatura del aire, el efecto *Urban Heat Island* (UHI) que permitan proponer un sistema pasivo a través del aislamiento térmico en

recubrimientos de muros, impermeabilizantes en techos, ventanas con cristales especiales, para con esto evitar la ganancia y la pérdida de calor [77].

El aislamiento adquiere mayor importancia como el medio para conservar y ahorrar energías [78], disminuir la dependencia de los sistemas mecánicos/eléctricos de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), además de reducir su costo inicial y operativo, al requerir equipos de menor capacidad, pues son éstos los que demandan la mayor parte de energía de un edificio que no tiene ningún control establecido por estándares de aislamiento térmico [5,79], inmuebles mal protegidos que se construyen en todo el mundo.

Otros beneficios del aislamiento eficiente es la ampliación de los períodos de confort térmico interior, especialmente entre estaciones climáticas. En la parte estructural se evitan los cambios de temperatura que pueden causar movimientos térmicos dañando los elementos estructurales, se reduce la propagación del sonido y, además, se previene la condensación de vapor en las superficies de los edificios [75,80].

Los materiales que se consideran actualmente como aislantes de empleo tradicional como lanas minerales y fibras de vidrio, tienen conductividades entre 0.03 a 0.04 W/mK y se producen como tableros que en algunas ocasiones se emplean como elementos de relleno en cavidades de estructuras, al igual que el poliestireno expandido (EPS) y el poliestireno extruido (XPS) que alcanzan hasta 0.029 W/mK. Estos aislantes son elaborados en pequeñas esferas de poliestireno derivado del petróleo en presentaciones de esferas individuales o en placas. El

XPS se produce a partir de fundir el poliestireno y aplicarle gas extra para presionarlo y conseguir láminas que pueden alcanzar hasta 0.021 W/mK [5].

Otros materiales aislantes son los compuestos por celulosa, que se obtienen al comprimir fibras de papel y madera, mientras el poliuretano (PUR) se forma por la reacción de isocianatos y alcoholes que, durante su expansión, los poros cerrados se llenan de gases. Este material se puede encontrar en tableros o como espuma expandida; su aplicación tiene el inconveniente de generar problemas de salud, además de ser peligrosos en caso de incendios, pues producen Hidrógeno, Cianuro e isocianatos que son muy venenosos [5,81].

El PUR con 0.02 W/mK de conductividad térmica marca la diferencia entre los materiales aislantes convencionales con los super aislantes, clasificación que se definió por *Koebel et al.* en el 2012 para elementos que alcanzan conductividades por debajo de los 0.02 W/mK , que regularmente se componen por vacío, gases, nano aislantes, aislamiento dinámico, combinación de paneles y concretos, aislamiento con materiales tradicionales gruesos, entre otros, que serán la posible solución del aislamiento en el futuro [2,3,5,6,82].

Actualmente existen materiales que son denominados súper aislantes térmicos de alta eficiencia térmica, con un intervalo menor que 0.025 W/mK . Entre ellos están los paneles de aislamiento al vacío (VIP) y acristalamientos con vacío (VG), que presentan excelente resistencia térmica, ya que el material del núcleo o cavidad entre cristales, reduce la transportación del calor por medio de moléculas de gas, a diferencia de los aerogeles basados en SiO_2 , que no utilizan

el vacío, sino que el aislamiento se obtiene por su estructura mesoporosa [5], alcanzando conductividades de 0.012 a 0.02 W/mK, **Tabla 8**.

La principal propiedad de los materiales super aislantes es que deben tener muy baja conductividad, sin incrementarla con el paso de los años. Podrán cortarse para adaptarse a la construcción, sin perder sus resistencias térmicas, presentar buenos comportamientos mecánicos, protección contra incendios en cuanto a la emisión de humos y gases tóxicos, además de durabilidad por exposiciones climáticas [83].

Tabla 8. Materiales aislantes referenciados de acuerdo a su conductividad térmica [19].

Producto Aislante	Composición Química	Aislamiento Térmico λ Wm-1K-1
Lana mineral	Óxidos inorgánicos	0.034–0.045
Lana de Vidrio	Dióxido de Silicio	0.031–0.043
Espuma de vidrio	Dióxido de Silicio	0.038–0.050
Poliestireno Expandido (EPS)	Espuma de Polímero	0.029–0.055
Poliestireno Extruído (XPS)	Espuma de Polímero	0.029–0.048
Espuma de resina Fenólica	Espuma de Polímero	0.021–0.025
Espuma de poliuretano	Espuma de Polímero	0.020–0.029
Aerogeles de Sílice	Aerogel basado en SiO ₂	0.012–0.020
Paneles Aislados al Vacío (VIP)	Silicio sellado	0.003–0.011a
Acristalamiento al vacío (VG)	Doble cristal con espacio evacuado y pilares de apoyo	0.0001–0.0005b
		0.003–0.008c

2.2.1 Conductividad, resistencia y transmitancia térmica.

Teoría de flujo de calor: Ley de Fourier

El concepto de super aislamiento o alto rendimiento aislante, se puede definir a través del concepto de conductividad térmica (λ), que es la capacidad de los materiales de permitir un flujo de calor a través de una de sus superficies (A), conducirlos por su espesor (d) siempre de la parte más caliente a la más fría, y actuar en su otra cara como temperatura efectiva (ΔT) (1), conocida como la cantidad de calor que pudo transmitirse a través del material en un determinado tiempo (transmitancia U).

Para que el calor pueda transmitirse se debe tener una distribución de temperaturas no uniformes, una variación de calor entre distintos materiales o entre diversos puntos de un mismo cuerpo (1), donde (ΔT) es la diferencia de temperatura, (T1) corresponde a la temperatura menor y (T2) a la temperatura mayor.

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (1) \quad [84].$$

En la primera ley de la termodinámica se menciona que la transferencia de energía hacia un sistema es igual al incremento de la energía de ese sistema. La segunda ley establece que el calor se transfiere en la dirección en que la temperatura decrece [85].

La transferencia de calor por **conducción** determina la distribución de temperatura dentro de un material o sustancia y la velocidad con la que transfiere el calor en el mismo cuerpo [86]. La conductividad térmica es el proceso en el cual el calor es transmitido por moléculas más calientes a las moléculas más frías

de forma adyacente [87]. En los sólidos se presenta en un amplio intervalo de valores, dependiendo de si el sólido es, o no es buen conductor de calor, por ejemplo: Los metales conducen el calor, pero el asbesto es un mal conductor, por lo que es utilizado como aislante, **Figura 10.**

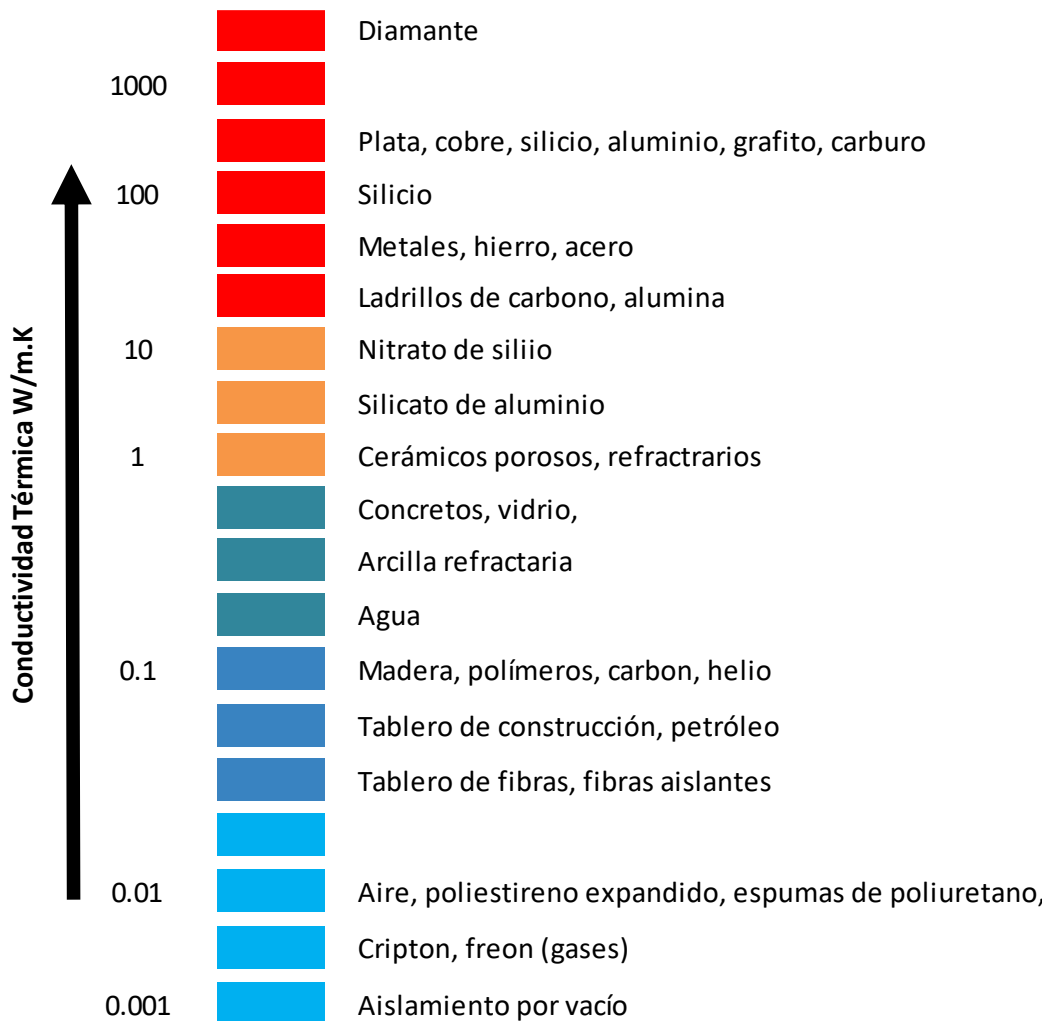


Figura 10. Conductividad térmica de diversos materiales [5].

La **convección** es una manera de transferir el calor sólo por medio de fluidos que presentan partículas de gran movilidad y se desplazan libremente por su poca cohesión como lo son los líquidos y los gases, se relaciona con la

velocidad del viento, la dirección y la rugosidad de la superficie. Por último, la transmisión de calor por la **radiación** térmica es la energía que emiten los cuerpos de manera radiante en todas las direcciones, por lo que, si a un cuerpo frío le llega esta energía, la absorbe aumentando su energía interna y, por lo tanto, aumenta su temperatura. Se explica como una onda que transfiere el calor y puede ser por sólidos, líquidos y gases [5].

La conductividad térmica se realiza mediante la conducción del calor a través de un medio sólido, radiación y gas. Se mide mediante la unidad de W/mK, donde la suma de todos los tipos de conductividades se denomina conductividad térmica efectiva [88]. En la mayoría de las investigaciones la conducción del calor por medio de radiación y convección lo estiman a través de las afectantes climáticas al llevar las experimentaciones en ambientes controlados como los laboratorios [89].

La cantidad de calor (Q) que fluye a través de un cuerpo o superficie (A) en un intervalo de tiempo es proporcional a la variación o diferencia de temperaturas (ΔT), considerando la capacidad que tiene el material de conducir el calor, llamada conductividad térmica (λ)(2) [84], **Figura 11**.

$$Q = -\lambda(A/L) \Delta T \quad Q = -k.A(T_2 - T_1 / L) \quad Q = -(T_2 - T_1/R) \quad (2) \quad [84].$$

La unidad de medida de la conductividad térmica es representada por (λ o k), que es proporcional a la energía en un tiempo determinado (W), entre la longitud de cambio de temperatura (m) y la temperatura generada (K)(3).

$$\lambda = W/mK \quad (3) \quad [84].$$

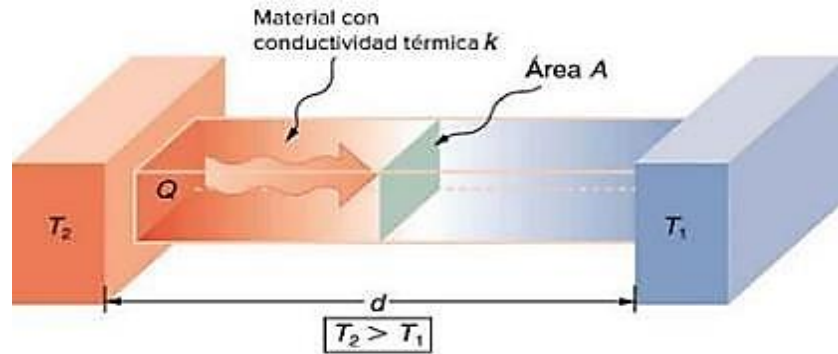


Figura 11. Conducción de calor a través de cualquier material, [84].

La oposición o resistencia para transmitir el calor (R), es la propiedad de aislamiento térmico de un material [58]. La transmitancia de calor o transmitancia térmica, igual que la conductividad térmica, son expresadas por vatios o Watts (W) por metro cuadrado (m^2) Kelvin (K), por lo tanto, la relación de unidad sería W/m^2K [90].

La resistencia térmica conocida también como valor “ R ” es la propiedad de los materiales de resistirse, oponerse al flujo de calor. Es una medida de diferencia de temperatura o valor que se utiliza para calcular la transferencia de calor a través de los materiales, definiéndose como la cualidad del aislamiento térmico [91]. Es la propiedad inversa a la conductividad **(4)**, como una resistencia eléctrica está asociada con la conducción de electricidad, una resistencia térmica puede estar asociada con la conducción de calor [92].

$$R_t = \frac{L}{kA} \quad (4) \quad [92]$$

Donde k es la conductividad del material (W/mK), L es el espesor del plano (m) y A corresponde al área del plano (m^2).

Se establece dentro de la Norma NMX-C460 que conocer la resistencia térmica de un edificio o envolvente de una vivienda proporciona información que permite crear estrategias que disminuyen el uso de energía por climatización, para lo cual se deberá conocer el Valor “R” en los techos, las aberturas y los muros, considerar si son materiales homogéneos o no, su espesor y la conductividad térmica que se puede determinar en forma inversa a su conductancia térmica [93]. La resistencia térmica total o absoluta, es la inversa del coeficiente de transmisión de calor de un elemento que es la suma de las resistencias térmicas superficiales y la resistencia térmica del elemento constructivo [85].

Cuando se tienen elementos compuestos por diversas capas o llamados también materiales no homogéneos, con superficies planas y paralelas se puede determinar que el flujo de calor es unidireccional, se estima la transmitancia térmica Valor “U” basándose en los estándares establecidos para cada uno de los elementos que lo componen, pero lo más recomendable es determinarlo por medio de experimentos y métodos de medición.

El grado de transmitancia de calor determina el nivel de aislamiento térmico de los materiales y los elementos constructivos; por lo tanto, define el ahorro de energía, el tiempo de transferencia del calor en las envolventes, así como la energía por calefacción en climas fríos y por enfriamiento en climas cálidos [93]. Se define que cuando se mide la transmisión de calor en un determinado tiempo, se le llama transmitancia o valor “U”, y puede ser llevado por conducción a través de un sólido o por su medio poroso; por convección, ya

sea líquido intersticial, aire y agua o bien por la radiación que se produce en el vacío o por medio del material sólido [19].

Se puede calcular el valor “U” sumando la resistencia térmica de cada capa del sistema constructivo, agregando las resistencias de la superficies externa e interna, sólo que de este modo no se cuantifican los puentes térmicos causados por estructuras o algunos otros elementos como la unión de morteros, espacios, cavidades de aire y contenido de humedad **(5)** [88].

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{s_i} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{s_e}} \quad (5) \quad [94]$$

Donde U representa la transmitancia térmica, R_t la resistencia térmica total, R_{s_i} la resistencia térmica superficial interior, R_1 la resistencia térmica de cada una de las capas que forman el elemento y, por último, R_{s_e} que es el valor de la resistencia térmica superficial exterior.

La inercia térmica es otro concepto que se explica como el amortiguamiento y el desfase de la onda térmica que se origina por los efectos del comportamiento de los cerramientos exteriores, que son los elementos que reciben la mayor radiación y donde la energía se almacena y en algunas ocasiones cede, no de forma instantánea. El tiempo o período entre el momento en que la radiación incide sobre el material y el momento en el que, tras atravesarlo es cedida al otro lado, se le llama desfase de la onda térmica. La masa del muro no sólo provoca el desfase de la onda térmica, sino que amortigua su intensidad [95].

2.2.2 Pérdida y ganancia de calor, balance térmico de envolventes.

Termodinámica es la parte de la Física que estudia las transformaciones de la materia debido a sus variaciones de temperaturas y la energía intercambiada; busca el conocimiento de la comunicación del calor mediante diversas formas, todo mediante la comprensión de fenómenos naturales y la capacidad de un cuerpo de transferir el calor cuando existe un desequilibrio térmico; es decir, cuando una de las partes es más caliente que las otras [91]; determina las transformaciones, reacomodos de energía, dirección de los procesos de transferencia de calor en los cuerpos y la materia [96].

Calor es la energía que se transporta y se mueve mediante una diferencia de temperatura (gradiente), al proceso mediante el cual tiene lugar el transporte de energía se le conoce como transferencia de calor, que puede generarse a partir de una reacción química (como la combustión), una reacción nuclear (como aquellas que se desarrollan dentro del Sol) o una disipación (ya sea mecánica, fricción, electromagnética y de microondas) [96].

Es importante tener en cuenta que los cuerpos no tienen calor, sino energía interna. Cuando una parte de esta energía se transfiere de un sistema o cuerpo hacia otro que se encuentra a distinta temperatura, se habla de calor. El traspaso de calor se producirá hasta que los dos sistemas se sitúen a idéntica temperatura y se alcance el denominado equilibrio térmico [96].

Temperatura es una propiedad termodinámica que se asocia con la sensación caliente y frío, se relaciona con el movimiento de las moléculas de un cuerpo que al aumentar la temperatura se incrementa la actividad y la velocidad

del movimiento molecular, por ser una propiedad puede medirse a través de la Ley Cero de la termodinámica, por medio de termómetros de bulbos, a) termistores, b) termopares, cámaras fototérmicas, entre otros equipos y se utiliza la escala Kelvin (K) o °C [96].

Transferencia de calor es la ciencia que estudia el intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos, fuentes y receptores, las diferencias de temperatura son denominadas gradientes. La Transmitancia térmica (Valor “U”) es la cantidad de energía en forma de calor que atraviesa a un cuerpo en cierta unidad de tiempo. Cuando se tienen las caras planas y paralelas en un cuerpo, y entre ellas hay una diferencia térmica, esta diferencia constituye la transmitancia térmica del cuerpo, es el inverso a la resistencia térmica (Valor “R) y se define por la fórmula: $U = W$ (energía por unidad de tiempo) / m^2 (Superficie del cuerpo) por K (Diferencia de calor)(6).

$$U = W / m^2 K \quad [96].$$

La transferencia de energía o calor se produce a través de un medio de alta temperatura hacia uno que tiene menor temperatura, deteniéndose cuando se alcanza el balance o la misma temperatura en los dos elementos [85]. El principio “Cero” establece que los cuerpos tienden a buscar un equilibrio térmico, y cuando lo consiguen no generan flujo de energía en forma de calor [92].

Los estudios en aislamiento térmico tienen como objetivo determinar la razón de la transferencia del calor, así como la rapidez con la que se origina [85], calcular la resistencia térmica de los elementos y envolventes de las construcciones; el equilibrio termodinámico se asocia a la falta de gradientes lo

que significa que la temperatura dentro del cuerpo o sistema se mantiene uniforme y no cambia en ninguna de sus partes, el llamado balance térmico [96].

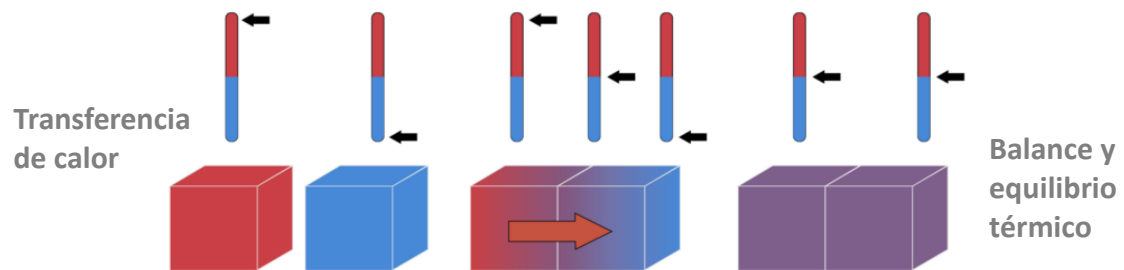


Figura 12. Diagrama de transferencia de calor y equilibrio térmico [96].

2.2.3 Elementos envolventes de la edificación.

Las envolventes tienen el papel más importante en lo que respecta al consumo de energías en un edificio; por esta razón hay un gran interés de investigadores e inversionistas en generar diferentes tecnologías que contribuyan a que el consumo de energía por calefacción y sistemas de enfriamiento sea disminuido a través de recubrimientos eficientes.

Para evaluar el rendimiento térmico de las tecnologías de construcción en las envolventes, se analiza cómo logran interferir y reducir el consumo de energías, su función como amortiguador térmico, la tasa de radiación absorbida, su impacto ambiental y el ciclo de vida [97].

La cubierta externa del edificio es la que interactúa con el ambiente exterior, el clima, la temperatura, el aire y la radiación solar, por lo que es importante determinar cómo el flujo del calor se transporta a través de los elementos envolventes, llega hasta el interior y provoca la modificación de la temperatura, tomando en cuenta que esta condición lleva a cuidar y evitar los

puentes de calor [98], así como tener presente que el aislamiento térmico en los muros es más eficiente en el exterior del edificio.

Para lograr el aislamiento térmico, además de emplearse nuevos materiales, se están manejando incrementos de espesores en materiales tradicionales; sin embargo, las envolventes gruesas no son aceptadas por cuestiones de espacio, economía, superficie, volumen, restricciones de uso y técnicas. Los nuevos materiales han demostrado que la baja conductividad térmica se obtiene con elementos relativamente delgados, con alta resistencia térmica y un valor de baja transmitancia.

Mientras que la estructura externa de un edificio cuente con un mayor rendimiento en cuanto al aislamiento térmico, se reducirá el consumo de energía en el interior, se deberá además cuidar el comportamiento térmico en los componentes de las envolventes, por ejemplo: en las fachadas las pérdidas por transferencia de calor es de aproximadamente entre 60 y 70%, en los techos alrededor del 10%, en puertas y ventanas con un intervalo de 20 a 30%, por lo que las medidas efectuadas en la protección de los muros tendrán un mayor beneficio en el confort de los espacios [30].

Se debe examinar que los materiales modifiquen y mejoren las propiedades de las superficies, considerando su capacidad de transferencia, su conductividad térmica, sus coeficientes de emisión y de reflectancia, cualidades que las distingue de las superficies ordinarias [97]. La Norma ISO 9774:2004 referente a las aplicaciones constructivas, recomienda que el aislamiento térmico en fachadas y muros puede realizarse por el exterior utilizando un recubrimiento,

mientras en el interior sugiere aislarse con elementos auto portantes compuestos por una estructura que sostenga a un elemento ligero como paneles [99].

En lo referente a cavidades o espacios vacíos, el aislamiento puede realizarse entre hojas del muro, cámara ventilada, cámara sin ventilar y revestimiento exterior, siendo el aislamiento exterior el de mayores ventajas, pues evita condensaciones intersticiales, disminuyen elementos que funcionan como puentes térmicos y, además, se aprovecha la masa del mismo edificio. En lo que respecta al aislamiento de edificios considerados patrimonio cultural, es recomendable que el aislamiento se realice por medio del espacio interior para que las fachadas no sean modificadas.

Las envolventes actúan como zona de comunicación térmica, por lo que se busca que consigan un alto rendimiento térmico, que aseguren bajar el consumo de energía y alcanzar la comodidad térmica [31]. La energía de un edificio está determinada por la pérdida y la ganancia de calor a través de las envolventes [100]. La protección de los muros por medio del aislamiento térmico puede ahorrar hasta un 77% del consumo de energía por climatización. La transferencia de calor por los muros se hace a través de la conducción, convección y radiación, siendo esta última la fuente de calor más directa de un edificio y que, regulándola, se obtendrán reducciones en el consumo de energía [32].

2.3 Eficiencia energética a través del aislamiento térmico.

Eficiencia energética es el acto de reducir la demanda del consumo de energía que se necesita para realizar todas las actividades en un determinado edificio, sin afectar su calidad y garantizar su operatividad sustentable en espacios confortables [101]. En la actualidad existe la preocupación sobre el uso de energías fósiles y sus implicaciones para el medio ambiente, la amenaza del calentamiento global y el cambio climático han despertado la conciencia sobre el crecimiento y la construcción de las ciudades, el uso de energías y contaminantes ambientales [102]. El cambio climático antropogénico es directamente ligado al sector de la construcción como el principal consumidor de energía [103], pero también el de mayor potencial para el ahorro de las mismas.

Desde 1970 se vienen realizando estudios con respecto a esta situación, reconociendo que el problema surgió por la ausencia de reglamentaciones para la construcción y el uso de materiales [104], por lo que hoy en día, se han formado compromisos que van desde el estudio de factores como los afectantes climáticos, la ubicación del edificio y, sobre todo, la construcción y diseño de las envolventes, donde se deben considerar diversas medidas como aislantes térmicos, ventanas y revestimientos reflectantes para lograr la eficiencia energética en la edificación [102].

Las envolventes sin aislamiento en un edificio son los elementos que afectan al confort térmico y el equilibrio energético. Sus propiedades dictarán el grado de consumo de energías por calefacción y refrigeración [105], además de

ser los componentes responsables de un porcentaje mayor del consumo total de energías en la construcción, situación que se debe solucionar [106].

Las nuevas edificaciones ya se construyen tomando consideraciones sobre eficiencia energética, reglamentaciones, procesos constructivos de menor impacto ambiental, uso de materiales más eficientes para el aislamiento y estándares para las envolventes, consideraciones de límites de consumos, certificados de energía y la inclusión de tecnologías pasivas que ayudan a obtener edificios eficientes [107]. El problema ahora está en el número de construcciones edificadas con anterioridad, que requieren ser rehabilitadas energéticamente y considerar un aislamiento térmico que les permita el confort ambiental dentro de sus espacios [107].

Es indispensable considerar que los componentes del edificio como muros y cubiertas deberán funcionar como sistemas de aislamiento térmico pasivos durante su vida útil [76], serán los que por su eficiencia reduzcan la transmisión del calor o el frío al interior de los espacios. Por esta razón se vuelve prioridad crear materiales que tengan la propiedad de proteger al edificio de las temperaturas de climas extremos y por consiguiente obtener edificios de mayor eficiencia energética. Se estima que los edificios consumen hasta el 40% de la energía mundial [81], y que este porcentaje se incrementará hasta un 50% más para el 2050, como resultado de la utilización de aparatos de climatización [2], dando lugar a una crisis energética [108,109], con impactos ambientales, sociales y económicos adversos.

Uno de los mayores retos para la construcción, es la reducción del consumo de energía en los edificios [110], lograr su eficiencia energética principalmente por un buen diseño de las envolventes y sus comportamientos térmicos [81]. Se procurará construir con materiales de alta eficiencia térmica, que brinden una mayor protección, que reduzcan la demanda de energía por refrigeración y calefacción de los espacios, ahorrando hasta un 15% de electricidad en verano, o del 35 al 47% en las demandas de enfriamiento en todo el año [32], además de evitar las pérdidas y ganancias por transferencia de calor, estimadas entre el 60 y 70% en las fachadas [109,100], elementos que logran un mayor beneficio hasta un 77% en el consumo de energía por climatización [100].

2.3.1 Materiales aislantes térmicos.

Actualmente se busca desarrollar y producir materiales aislantes que tengan excelentes propiedades, menor impacto ambiental, relativamente económicos [111], que sean producidos con recursos alternativos que ayuden al desarrollo sustentable y que, por su conductividad térmica, sean aprovechados para el aislamiento térmico de la edificación por su baja densidad, alta resistencia térmica y rentabilidad [112]. Los productos de aislamiento térmico evitan la dependencia de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), logran espacios interiores cómodos con un número mayor de horas de confort [112].

Un material es considerado aislante térmico cuando su conductividad es menor que 0.1 W/mK [113]. La estrategia de un aislamiento óptimo puede llegar

ahorrar de un 24 a un 52% de energía en algunas zonas climáticas, además que la rehabilitación energética por medio de muros exteriores, logran un ahorro de un tercio del costo invertido en un tiempo corto, convirtiéndose en un proceso viable [34]. Las principales características de un rendimiento térmico son: su conductividad térmica y el flujo de calor que pasa a través del espesor del material, además de la capacidad para almacenar y conducir la energía térmica [114]. Los materiales aislantes se pueden clasificar en cuatro grupos: los inorgánicos como la fibra de vidrio y roca, que representan el 60% del mercado, mientras el 27% corresponde a los orgánicos.

Los materiales orgánicos derivan de los recursos naturales, por lo que son renovables, reciclables, respetuosos con el medio ambiente y de energía menor que la de los materiales tradicionales. En esta categoría están el polietileno, las fibras de vidrio, el algodón, el yute, el cáñamo, el bagazo, el coco y la linaza. Actualmente, los aislamientos convencionales son el poliuretano (PUR), poliisocianurato (PIR), poliestireno extruido (XPS), poliestireno expandido (EPS), como los más utilizados por su baja conductividad térmica. Los materiales combinados como la espuma de yeso, la lana y las fibras de madera manejan una presentación por lo regular en paneles [112]. A este grupo de materiales también se les puede nombrar aislantes alternativos [114].

Se han producido materiales para el aislamiento que logran mayor resistencia térmica, los llamados materiales avanzados, como los paneles de aislamiento al vacío (VIP), paneles rellenos de gas (GFP), espuma de celda cerrada, aerogeles y materiales de cambio de fase (PCM). Todos sobresalen por

su expectativa de vida de más de 50 años y su principal beneficio es que logran reducir el espesor de las capas, en comparación con los materiales de aislamiento convencional [115].

Los VIP sobresalen por la conductividad térmica de 0.004 W/mK [112], mientras que los aerogeles se consideran materiales aislantes de última generación [112]. Se nombran de esta manera, porque sus características, producción y aplicación aún están en proceso de estudio y puede llevarse décadas para descubrirse e implementarse por completo [116]. Regularmente estos materiales tienen características superiores a los convencionales y sustentables, **Tabla 9**.

Se menciona que durante la producción del aerogel, se consume energía y recursos, pero su balance energético es positivo, por toda la energía que puede ahorrar en su aplicación [112]. Todos los materiales de aislamiento de última generación tienen el problema de presentar baja propiedad mecánica, alto costo y toxicidad, pero exhiben las más bajas conductividades térmicas superiores a los materiales aislantes tradicionales y sustentables.

Según la norma DIN 4108 (organismo nacional de normalización de alemana), el aislamiento térmico y la economía energética de los edificios, deben considerar materiales de aislamiento térmico de conductividad inferior a 0.1 W/mK [112]. Los valores inferiores que 0.03 W/mK se consideran como eficientes aislantes [83], de 0.03 a 0.05 W/mK moderados, y los superiores a 0.07 W/mK menos efectivos [117]. Los materiales de baja resistencia térmica tienen conductividades menores que 0.5 W/mK, los de resistencia media obtienen

conductividades mayores que los 0.2 W/mK y de alta resistencia térmica de no más de 0.1 W/mK, [118-119].

Tabla 9. Clasificación de materiales aislantes [112].

Grupo Principal	Subgrupo	Aislamiento del material	Densidad	Conductividad Térmica
Inorgánico	Fibroso	Lana de vidrio	13-100	0.03-0.045
		Lana mineral	30-180	0.033-0.045
	Celular	Silicato de calcio	115-300	0.045-0.065
		Vidrio celular	115-220	0.04-0.06
		Vermiculita	70-160	0.046-0.07
		Cerámico	120-560	0.03-0.07
Orgánico	Espumado	EPS	15-35	0.035-0.04
		XPS	25-45	0.03-0.04
		PUR	30-100	0.024-0.03
		PIR	30-45	0.018-0.028
		Corcho	110-170	0.037-0.05
	Espumado, expandido	Espuma de melamina	11	0.035
		Espuma fenólica	40-160	0.022-0.04
		Espuma de polietileno	25-45	0.033
	Fibroso	Fibra de vidrio	24-112	0.033-0.04
		Lana de oveja	25-30	0.04-0.045
		Algodón	20-60	0.035-0.06
		Fibras de celulosa	30-80	0.04-0.045
		Yute	35-100	0.038-0.055
		Cáscara de arroz	154-168	0.046-0.056
		Cáñamo	20-68	0.04-0.05
		Bagazo	70-350	0.046-0.055
		Coco	70-125	0.04-0.05
Linaza	20-80	0.03-0.045		
Combinados	Tableros	Espuma de yeso	n/a	0.045
		Lana de madera	350-600	0.09
		Fibras de madera	20-270	0.04-0.09
Materiales avanzados		VIP	150-300	0.002-0.008
		Aerogel	60-80	0.013-0.014

Las propiedades térmicas de estos materiales se determinan de acuerdo con tres diferentes métodos y condiciones: la dependencia temporal de la temperatura durante la medición puede ser estacionaria, dinámica y de pulso

periódico de calor. De acuerdo con estos métodos se consigue la conductividad y resistencia térmica, transmitancia, transmitancia térmica periódica y el cambio de onda térmica [114].

En la medición estacionaria se crea un gradiente de temperatura de forma constante entre las dos caras de la muestra, mientras en forma dinámica o transitoria el gradiente es dependiente del tiempo y de la posición obteniéndose más datos y de forma más rápida [120].

2.3.2 Confort térmico, temperatura operativa y consignas de temperaturas.

Los espacios deben ser ambientes adecuados, que ofrezcan condiciones ambientales óptimas como luz, sonido, aspectos estéticos, físicos y psicológicos, pero, sobre todo, los asociados con el ambiente térmico, como la temperatura, la humedad y el movimiento de aire que crean el confort que se describe como un estado de comodidad en el que las personas no experimentan algún tipo de estrés físico o psicológico debido a estos factores ambientales [121].

Confort térmico es la satisfacción humana con el ambiente térmico [122], es una condición mental en la que se experimenta agrado [123], es un concepto subjetivo que se obtiene partiendo del equilibrio térmico del ser humano, es la relación de la producción del calor interno del cuerpo y la pérdida del calor en el medio ambiente que se mantiene en equilibrio cuando el cuerpo tiende a autorregular su temperatura a través de la piel; por lo tanto, el confort térmico se da cuando el ambiente también llamado entorno térmico exterior como interior,

permite la comodidad, siendo ésta una percepción mental donde se experimenta satisfacción y bienestar dentro de un determinado entorno térmico [123].

El balance del calor del cuerpo humano se puede obtener cuando la producción interna del calor es igual a su pérdida de calor hacia el medio ambiente en un entorno moderado. El sistema termorregulador del cuerpo automáticamente intentará modificar la temperatura de la piel al elevar la temperatura, secretando sudor para mantener equilibrio térmico [123]. El cuerpo humano debe mantener una temperatura aproximada de 37°C independientemente de su entorno ambiental. Cuando una persona es capaz de conservar esa temperatura sin ningún esfuerzo fisiológico [124], se encontrará en estado de confort térmico, por lo tanto, sentirá satisfacción ante esas condiciones.

La temperatura de la piel, su modificación y el impacto de la pérdida de calor ocasionan la sensación térmica [125]. Estos parámetros son considerados para calcular el índice y predecir el confort térmico después de diversos cambios de temperatura [126]. Cuando la suma del calor metabólico más el calor obtenido en el cuerpo por convección, radiación, conducción y evaporación, es mayor o menor de cero, el equilibrio térmico se rompe llevando a la persona a un proceso de desconfort que lo puede llevar hasta experimentar estrés [124].

El confort térmico se determina de acuerdo con el estándar de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE 55), donde se establecen las condiciones térmicas aceptables para los ocupantes de un determinado edificio, considerándose aspectos de ambiente interior como la temperatura, la radiación térmica, la humedad, la velocidad del viento, la actividad

del espacio y la vestimenta utilizada. Se pueden determinar aproximaciones de condiciones para espacios funcionando de modo pasivo o en modo mecánico con sistemas de climatización [127].

Para los edificios que utilizan sistemas mecánicos el confort puede ser determinado por medio del método gráfico y el método analítico. En el primero sólo se tiene que determinar la temperatura operativa que se obtiene con el promedio de la temperatura del aire [127], la temperatura radiante que depende de la temperatura de las superficies que limitan el espacio y que es la que se acerca a la temperatura que perciben los ocupantes del edificio [128].

Se emplea un diagrama de psicometría para definir dos zonas de confort, una para invierno y una para verano, superpuestas parcialmente, consiguiendo límites de temperatura operativa y humedad ambiental, delimitando el intervalo donde la mayoría de las personas perciben confort. Si las condiciones se encuentran dentro de estos intervalos se asume que cumplen el criterio de confort; si no es así, se puede decir que se encuentran en zona de discomfort [129] **Figura 13**. La medición a través del método gráfico es una evaluación subjetiva estipulada por la ASHRAE, prediciendo por medio del índice del Voto Medio Pronosticado (PMV) que se utiliza para definir las aplicaciones de los sistemas HVAC. Este valor se obtiene del promedio de los votos de un grupo grande de personas, que responden a escalas de sensación térmica [123].

El método analítico evalúa el confort cuando no se puede respetar algunas condicionantes del método gráfico como la humedad, las tasas metabólicas o la vestimenta. Este método también se basa en el modelo PMV, pero se emplean

herramientas computacionales para el cálculo de las condicionantes de confort, la sensación térmica, así como el porcentaje de personas en disconfort (PPD) [127]. Si la sensación térmica no supera valores del 10% de PPD, entonces se asume que el edificio cumple el estándar.

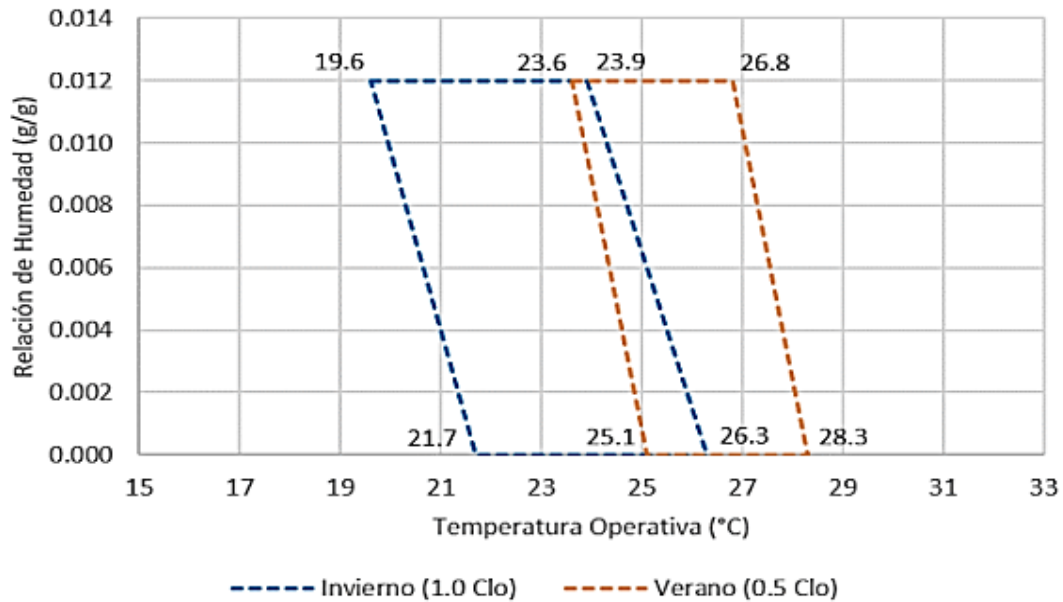


Figura 13. Intervalos aceptables de temperatura operativa y humedad, de acuerdo con el gráfico del estándar ASHRAE 55 [129].

Los edificios que funcionan en modo pasivo pueden ser evaluados de acuerdo con el método de confort adaptativo, que tiene como objetivo establecer temperaturas interiores donde la mayoría de las personas se sentirán confortables, considerando que las temperaturas calculadas no sean únicas, extendiéndolas en parámetros hacia arriba o hacia abajo, consiguiendo una zona o intervalo de confort de $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$, aunque algunos autores recomiendan intervalos de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ como lo plantea S. Szokolay [130].

La ecuación de confort adaptativo desarrollado por Dear, se expresa por una gráfica que define dos intervalos de temperaturas operativas de confort de

acuerdo con las temperaturas medias mensuales exteriores que van de 10 a 33.5°C. El primer intervalo con las temperaturas límites resulta de agregar $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ a las temperaturas de confort, considerando así un porcentaje de aceptabilidad del 80% de las personas que teóricamente se sentirían confortables, el segundo intervalo se calcula con el $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ para formar el intervalo del 90% de aceptación utilizado en un nivel de confort más estricto, **Figura 14.**

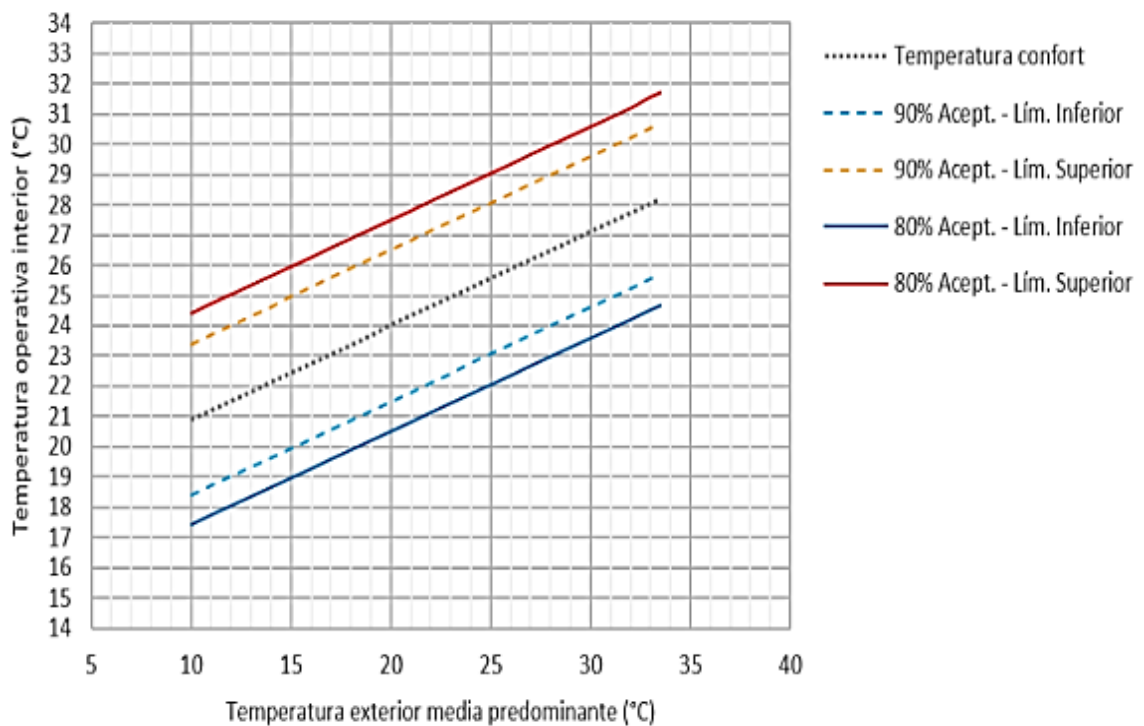


Figura 14. Temperaturas operativas para edificios funcionando en modo pasivo de acuerdo con el estándar ASHRAE 55, método gráfico Dear [131].

Para los edificios que funcionan de modo mecánico se establecen las consignas de temperaturas que es el intervalo de variación que se pretende mantener, y que son controladas y medidas por los termostatos de los sistemas de climatización. Para la calefacción se establece la consigna de 21°C y para la refrigeración de 25°C. Si la temperatura disminuye de los 21°C se activa la

calefacción y si aumenta más de los 25°C se enciende la refrigeración conservando el intervalo de confort establecido [128].

2.3.3 Eficiencia y ahorro energético por HVAC.

Cuando la envolvente de un edificio carece de un diseño y comportamiento térmico adecuado, la ganancia y pérdida de calor será excesiva. Se estima que la transferencia de calor puede ser de un 60 a 80% del total de un edificio. Esto genera del 20 al 50% del consumo de energía destinada para los sistemas HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) de los interiores [31]. Se tiene estimado que para el 2016 el 39.5% de la energía producida en todo el mundo se utilizó para calentar y enfriar edificios [132].

Las nuevas normas de aislamiento térmico de los edificios tienden a reducir la energía utilizada para la calefacción, que equivale a dos tercios del consumo y la mayor parte de las emisiones CO₂ [53]. La simulación térmica permite estimar con frecuencia temporal, la potencia térmica que requieren ciertos servicios [133], su consumo de energía kWh, su transferencia y el flujo de calor generado por la envolvente y por cada capa del sistema constructivo [31].

Se han determinado los beneficios generados por el aislamiento térmico de los muros exteriores, la ganancia y la pérdida de calor, la eficiencia energética por la reducción de calefacción y refrigeración, todo esto considerando los datos climáticos promedio mensuales del Chartered Instituto of Building Services Engineers (CIBSE), además de la temperatura interna, la conductividad térmica

de los materiales, el espesor requerido o factor R (m^2K/W) del edificio sin aislante y con aislante [134].

2.3.4 Modelación y simulación energética por aislamiento térmico.

Para una estimación de beneficio - costo se debe considerar el ahorro de energía directamente determinado por medio de la tarifa de energía eléctrica y el período de reembolso de la inversión por la aplicación del aislamiento térmico.

Las estrategias para mejorar el comportamiento térmico de la construcción se hacen combinando las operaciones técnicas, la evaluación de beneficio-costo y la sustentabilidad ambiental, además de la capacidad térmica, el aislamiento, el calentamiento pasivo, los puentes, el diseño, la posición, la orientación del edificio, el clima exterior, los sistemas solares pasivos, la protección solar y el clima interior.

Se realiza un estudio sobre el consumo de energía en el uso continuo de aire acondicionado para lograr un diseño de ahorro de energías por medio de una simulación numérica que compara el rendimiento térmico de diversas formas de aislamiento térmico para comparar el consumo diario contra un diseño con el propósito de ahorro de energías. Se toman los efectos térmicos de cada sistema y el flujo de calor en el interior, combinado con la operación de los aparatos de aire acondicionado en forma intermitente, además de considerar los coeficientes de transferencia de calor de cada sistema.

Para el aislamiento térmico en el interior es mejor evaluarlo con el sistema HVAC funcionando en forma intermitente y reduce la carga entre un 44 a un 55%, mientras que para la evaluación del aislamiento exterior es conveniente utilizarlo en forma continua y el ahorro de energía es más alto que un 52 a 65% resultados por medio de mediciones realizadas en diferentes condiciones climáticas.

La simulación investiga el rendimiento térmico, modelado teórico, estudio experimental e investigación de simulación numérica y se consideran las diversas variantes como condiciones climáticas locales, tiempo, limitaciones del sitio e interacción entre otros factores. Uno de los métodos es la técnica computacional de dinámica de fluidos, donde se analiza la transferencia de calor dentro y alrededor del edificio en forma de 2D y 3D, a través de herramientas de simulación como ANSYS/Fluido y ANSYS/CFX.

Además, se puede realizar la simulación por medio del programa Energy PLUS a través de su interface Design Builder, donde se integran las dimensiones del espacio, el área, y cómo están compuestos los elementos a evaluar por ejemplo: la capa de recubrimiento exterior, el material del muro, el recubrimiento interior, además de utilizar los parámetros de algunas propiedades como conductividad térmica, densidad, espesor de cada capa, calor específico, absorbanza térmica, absorbanza solar y absorbanza visible.

Otros parámetros considerados son el número de personas 0.32 personas/m², una tasa de ventilación de aire de 0.0203 m³, la función y actividad de cada espacio, condiciones diarias en correspondencia a la zona climática,

análisis en la semana extrema fría y la caliente, promedio de temperatura del aire (°C) y el incidente de radiación solar (kWh/m²) [32].

Con estas condiciones se obtienen los impactos en cargas anuales de energía y la emisión de CO₂, determinando las demandas anuales de energía por calefacción y refrigeración, así como la producción de Carbono relacionada con la energía consumida, los ahorros de energías que contribuyen a la emisión de CO₂, el rendimiento anual energético y el medio ambiente del edificio (energía, medio ambiente y beneficios de los sistemas de aislamiento) [32], una evaluación del impacto por estrategias de aislamiento pasivo en el consumo de energía eléctrica de dispositivos de acondicionamiento.

2.3.5 Beneficio - costo de materiales de construcción

Los sistemas de calentamiento y enfriamiento son una parte importante para la conservación y mejoramiento de la eficiencia energética de los edificios; una de las estrategias de modernización es el aislamiento del envolvente del edificio y se han puesto en práctica diversos métodos para el análisis de beneficios-costos de las medidas de modernización como generar beneficios económicos (reduciendo los costos por refrigeración y calefacción de los edificios) pero también algunos indirectos como el valor de la propiedad, el aumento en el alquiler del espacio o bien en la mejora del nivel de confort, los cuales son difíciles de estimar y llevarlos a una estimación económica.

Los beneficios directos consideran que el ahorro de energías en los edificios en forma óptima puede llegar a ser de 24.8% del consumo de energía y

algunas investigaciones reportan el mayor ahorro recuperado de 53% en la zona climática de Suecia; algunas otras investigaciones han estimado de un 26 a 58% considerando la sustitución de ventanas y puertas, así como la actualización de sistemas de acondicionamiento [92].

Se han desarrollado diversos métodos uno de ellos matemático para el análisis de energía, donde se incorporan medidas como la modificación a la envolvente del edificio, sistemas que utilizan energía, así como algunos que incluyen energías renovables. Se ha realizado simulación de energía por medio del Energy Plus obteniendo que los mejores resultados serían además de aislar muros, cambiar la unidad de acondicionamiento de aire y el reemplazo de ventanas para ofrecer un mayor beneficio [92].

El aislamiento en el techo es una estrategia económicamente rentable pero el período de recuperación es de 15 a 30 años, mientras que aislando los muros externos conduce a un ahorro de electricidad de un tercio del costo de la modernización, por lo tanto, se puede decir que es más viable.

Pérez y Fotios mencionan que el rendimiento térmico mejorado de algunas viviendas con sistemas de refrigeración mecánica para el clima del noroeste de México es viable en términos del consumo de energía y el periodo de recuperación de la inversión es aceptable. Por lo tanto, se define que el aislamiento de los muros externos tiene un mayor potencial en el ahorro de energías, conclusiones obtenidas por cálculos y simulación por computadora [92].

Se considera un método de evaluación financiera para llevar el análisis económico del beneficio-costos del edificio aislado para compararse con los costos sin protección de las envolventes para determinar las ganancias generadas durante la etapa de operación y obtener el período para la recuperación de la inversión y las ganancias generadas por el aislamiento [92].

Para considerar las afectantes al medio ambiente, se analizan los impactos en cargas anuales de energía y la emisión de CO₂, determinando el consumo de energía anual por calefacción y refrigeración, así como la producción de Carbono relacionada con la energía consumida y la disminución de la emisión de CO₂ que puede ser calculada multiplicando los factores de 0.232 y 0.758 kg CO₂ eq/kWh por el calentamiento, usando gas y el enfriamiento con energía eléctrica respectivamente [32].

2.4 Materiales aislantes avanzados

Los requisitos del ahorro de energía en la construcción han hecho que se busquen materiales con un alto desempeño como aislantes térmicos [135]. Actualmente se tienen materiales que se han utilizado comúnmente, pero además se utilizan otros de mayor innovación, como son los super aislantes de última generación, tales como paneles de aislamiento al vacío, paneles que contienen gas y los aerogeles que se encuentran en investigación y desarrollo [5].

Los estudios se concentran en solucionar las dificultades de estos materiales, como su costo elevado, sus propiedades mecánicas, su alto rendimiento térmico y uso óptimo como aislamiento, además, considerar los

impactos ambientales en su producción [135]. Esto lleva a que las investigaciones se enfoquen además en aprovecharlos junto con materiales de desecho en compuestos con alta capacidad de aislamiento, residuos que formen una matriz principal y reduzcan por consiguiente el costo del compuesto [136], beneficiando la reducción de emisiones no sólo por crear eco materiales aislantes sino por evitar la contaminación y las emisiones que se generan al ser desechados.

Debido a la conductividad térmica ultra baja de los aerogeles, es que se han convertido en un material alternativo para el aislamiento térmico, desplazando a los materiales convencionales, aunque actualmente presenta algunos problemas como su alto costo de producción que ha limitado hoy en día su utilización y explotación comercial [136], pero se espera un avance en las tecnologías de su producción a gran escala en las próximas décadas.

2.4.1 Aerogel de Sílice (AS).

El término Aerogel fue introducido por Kistler en 1932, para designar a los geles en los que el líquido se reemplaza por gas, obteniéndose una estructura sólida sin colapsar a través de un secado supercrítico que consiste en calentar un gel en una autoclave, hasta que la presión y la temperatura exceden la presión del líquido atrapado en los poros del gel, consiguiendo que el fluido sea evacuado como gas [5]. Al final sólo queda el esqueleto sólido con un volumen relativo de poros hasta >90% [137], algunas veces hasta 99.8% [5,32]. Esta condición permitió determinar rápidamente que una de las propiedades más importantes

del AS es su baja densidad que le permite ser el mejor y más eficiente aislante térmico.

Los Aerogeles son suficientemente fuertes, pero a la vez extremadamente frágiles; por lo tanto, las investigaciones se están enfocando en sus propiedades mecánicas [5]. Su estructura mesoporosa con tamaños de poros interconectados varía desde 2 a 70 nm, con un diámetro promedio de poro de 20 a 40 nm [78]; estos microporos clasificados en el intervalo nanométrico llegan a medir hasta <2 nm y forman una estructura nanométrica con la densidad más baja reportada para un material sólido [100], llegando hasta 274 kg/m³ [81], consiguiendo la llamada densidad esquelética (Skeletal Density) que lo hace ultra ligero.

La superficie específica o área superficial para las partículas de AS es muy alta, pues oscila entre 250 a 800 m²/g y pueden exceder hasta las 1,000 m²/g [32]. La arquitectura de sus redes se describe como geometría fractal, formando una red esquelética amorfa [32], con dimensiones nanométricas que le proporciona la más baja conductividad térmica documentada para un material sólido [108], con un intervalo de 0.02 a 0.012 W/mK llegándose a reportar hasta 0.008 W/mK a temperatura ambiente [138], valores inferiores a la conductividad del aire bajo las mismas condiciones, que oscila en 0.026 W/mK **Figura 15**.

En los materiales porosos como el AS, hay cinco formas de transferir el calor: por la conducción del material sólido, la conducción a través del medio poroso como el líquido intersticial, aire o agua, el transporte por convección por el medio poroso, por radiación de superficies a través de fluidos de poros y por radiación desde un sólido a través de la red o masa.

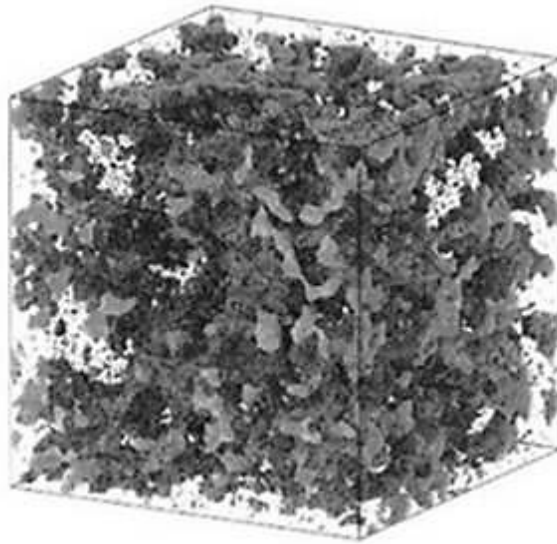


Figura 15. Densidad esquelética compuesta por nanoporos en AS [137].

La estructura mesoporosa con poros nanométricos limitan el transporte de calor por medio de moléculas de gas o aire, ya que la red sólida proporciona vías limitadas con pocos caminos libres para la conducción; los fonones o cuasi partículas que transportan el calor, encuentran en la red un camino difícil para su propagación, la transferencia del calor por medio de los vacíos intersticiales del aerogel no es posible por el tamaño de estas partículas que tienen dimensiones superiores que 60 nm, por lo tanto, más grandes que los huecos de la red, produciéndose el conocido efecto Knudsen [138], **Figura 16.**

Otra característica del AS que le otorga su propiedad térmica son sus propios puntos de contacto en la estructura, ya que presenta resistencias que disminuyen la conductividad térmica por medio del sólido y a esto se le suma el efecto de percolación que es la forma lenta en que los fluidos pasan a través de un material poroso provocando la lenta transmisión del calor.

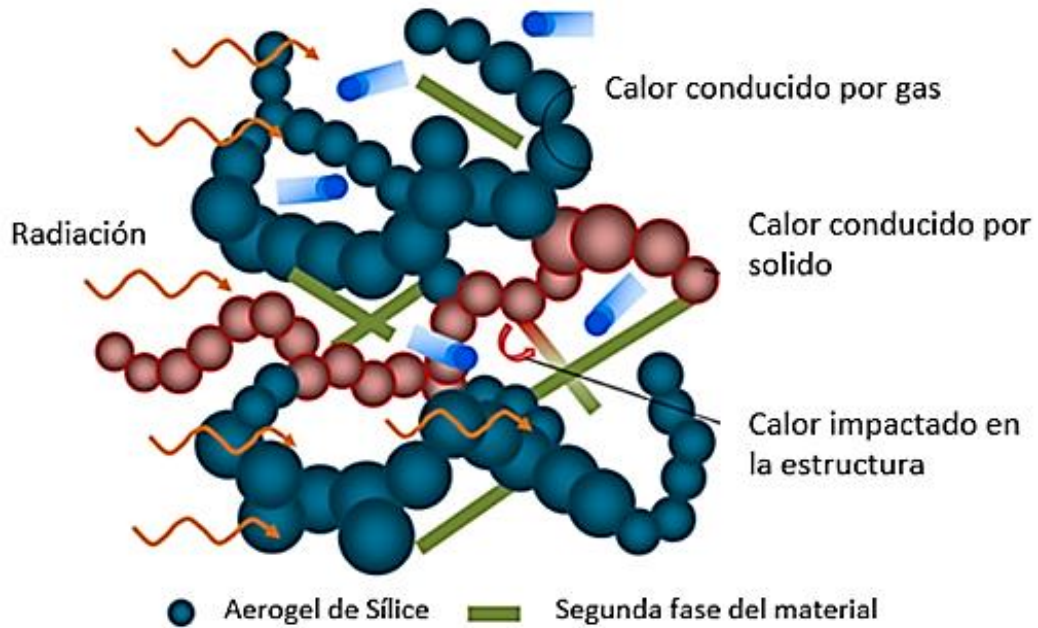


Figura 16. Estructura del aerogel y los mecanismos de transferencia del calor envolvente [138].

En cuanto al calor transmitido por radiación térmica, la opacificación (no transparente) reduce la conductividad térmica al atenuar los rayos que conducen el calor [5]. Los gránulos o partículas de aerogel se están produciendo en menor costo, en comparación con los aerogeles monolíticos, por lo que su utilización se está haciendo más popular como agregados en materiales compuestos que son basados en aglutinantes minerales y utilizados para el aislamiento; por lo tanto se estima que su aplicación se incrementará en las próximas décadas [25], sobre todo porque su baja conductividad térmica contribuye a minimizar las emisiones del dióxido de Carbono producido por la demanda de sistemas de calefacción y refrigeración [139].

El interés por el AS ha ido creciendo al paso de los años. Desde el momento que se obtuvo por primera vez en 1931, se comenzó a realizar

experimentaciones para su producción a través de un proceso de secado supercrítico con etanol, posteriormente en 1980 se realizó este proceso por medio de CO₂. En ese entonces se contabilizaban 100 artículos científicos y 100 patentes con este material, **Figura 17**.

Al paso de los años se formó la primera planta piloto en Suiza y se comenzó a producir aerogel orgánico; para 1990 se experimentó un proceso más sencillo, el secado a presión ambiente que generó una cantidad mayor de estudios incrementándose a 1,100 artículos y 600 patentes; además de formarse foros para tratar el tema en Francia, Gran Bretaña y Estados Unidos, con cuatro conferencias internacionales (1985-1997). En este año la Nasa comenzó a utilizarlo en diversos productos y con diferentes objetivos [138], **Figura 17**.

En el 2010 se obtuvo AS por medio de un secado en frío. Se comenzó a producir en la planta de Aspen y se obtuvieron diversos tipos de aerogeles metálicos, como grafeno. En el 2020 se comenzó a utilizar en impresiones 3D y como material agregado de diversos compuestos. En algunos países se comenzó a normar su empleo, por ejemplo: en China, en la Standard GB/T 34336-2017 y en Estados Unidos en la ASTM C1728-2012. En este período se celebraron tres conferencias internacionales en China, Reino Unido y Estados Unidos y la producción científica se exponenció hasta llegar a 5,000 artículos científicos y 4,000 patentes [138], **Figura 17**.

Las investigaciones se concentran en la parte mecánica del aerogel, por lo que se han experimentado diversos procesos y alternativas que logran mejorar sus propiedades para ese objetivo, por ejemplo: 1) se ha buscado doparse a

través del refuerzo con fibra y partículas funcionales, 2) se ha revestido con materiales que tienen la función de envolverlo, proceso que es conocido como conformación revestida, 3) se ha obtenido aerogel multicomponente al mezclarlo con otros materiales que funcionan como componentes ensamblados y 4) se ha obtenido aerogel combinando todas las tres alternativas anteriores, refuerzo con fibras, componentes ensamblados, envoltantes y partículas funcionales.

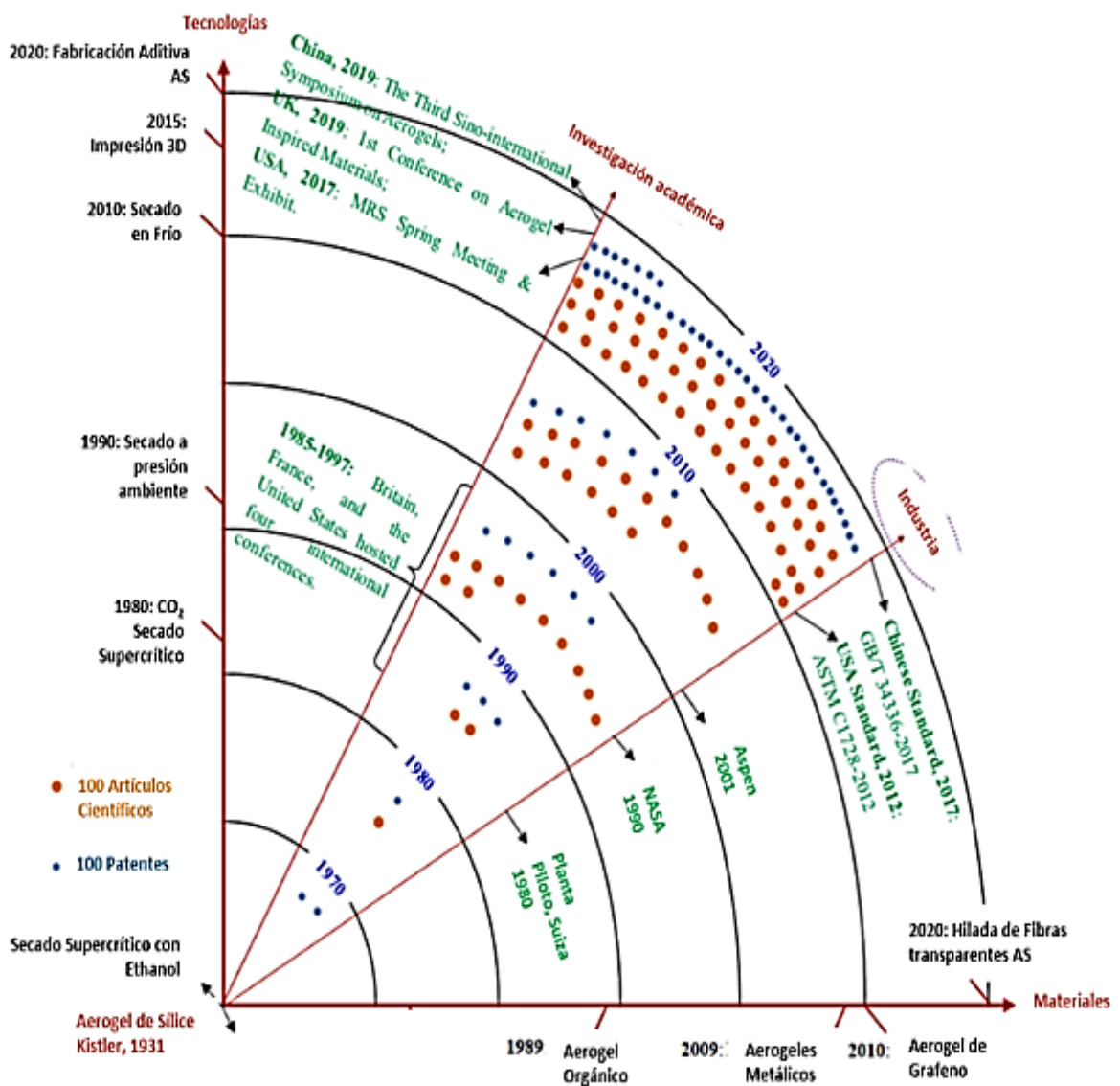


Figura 17. Línea de tiempo, desarrollo e investigación del AS [138].

Otros estudios buscan conseguir el incremento de la densidad del aerogel para lograr una estructura con una cantidad mayor de material sólido, además de buscar disminuir el envejecimiento por exposición a temperaturas y humedad que se han conseguido por métodos de sililación, [138] **Figura 18.**

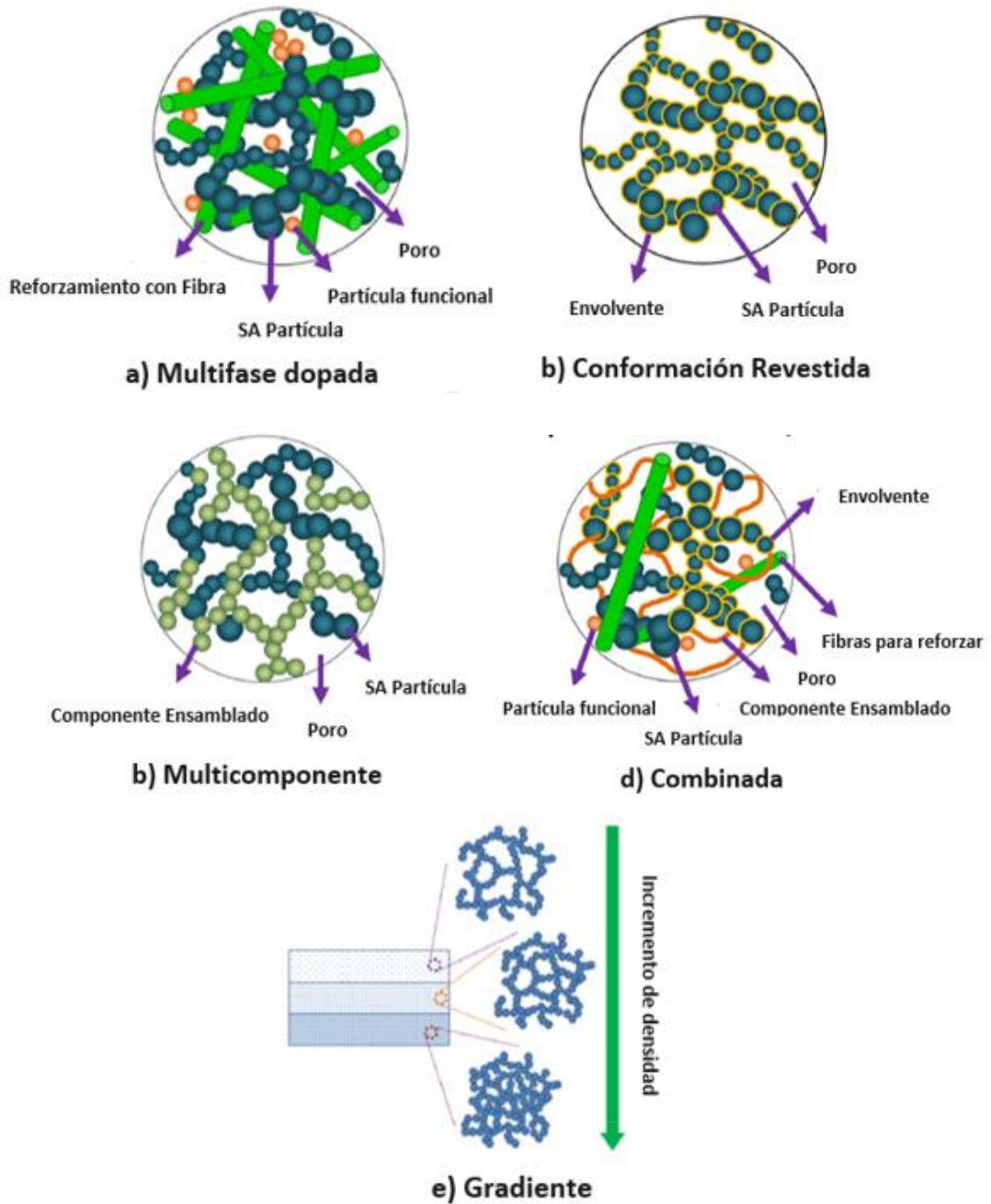


Figura 18. Alternativas de mejoramiento del AS [138].

En este estudio se modificó la energía superficial del AS, cambiando sus grupos polares y con ello su condición hidrófuga a hidrófila, a través de un proceso químico por medio de agentes tensoactivos que activaron la energía de la superficie para tener una mejor compatibilidad con las partículas líquidas de la pastas y morteros estudiados, **Figura 19**.

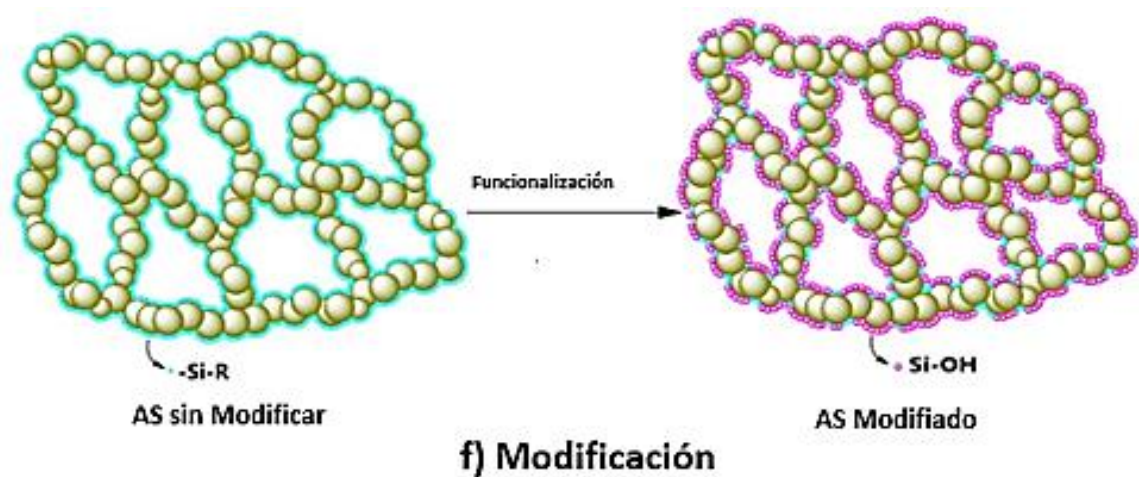


Figura 19. Modificación superficial partículas de AS [140].

2.5 Estado del Arte

2.5.1 Nuevas tecnologías para el aislamiento térmico con AS.

La tendencia actual es el ahorro de energía y la disminución de CO_2 , por lo que en la construcción esto se busca conseguir a través de un eficiente aislamiento térmico; por tal motivo se han experimentado compuestos que reemplazan al cemento y que, además, presentan baja conductividad térmica, regularmente entre 0.4 a 0.7 W/mK, [88]. Los mejores resultados de aislamiento térmico en edificios se han logrado con la utilización del AS, del cual se tienen diversos productos que actualmente se comercializan. Estos se diferencian por

la manera en que se incorporan a los materiales o su producción como sistemas, por ejemplo:

a) Aerogeles monolíticos de aproximadamente 1 cm de espesor, en forma de bloques que cuentan con baja conductividad térmica y excelentes propiedades ópticas; además, con una buena transparencia que les permite ser aprovechados en aplicaciones de acristalamientos y monolitos transparentes, [5, 89]. Se han utilizado en elementos translúcidos como policarbonatos estructurales, tragaluces [89], pero el secado supercrítico de estas piezas monolíticas y el proceso para obtener estas placas grandes sin que presente grietas, es muy poco comercial y de difícil obtención; aunque ahora las investigaciones están llevando a modificar los métodos y procesos del secado, se está experimentando con sistemas químicos que permiten realizar el secado por evaporación simple a presión atmosférica [5], sin densificación que llevará a producir placas de AS de una manera más sencilla.

b) En forma de partículas pequeñas menores que 1 cm como gránulos, y hasta 1 mm como polvos que presentan la misma conductividad térmica que los monolitos. Hasta ahora la ruta de secado supercrítico sólo permite producir partículas de Aerogel que se pueden utilizar para la fabricación de espumas, mantas y en este momento se están realizando investigaciones para emplearse como agregados a compuestos, pastas, morteros y concretos, donde se aprovechen sus propiedades térmicas y se mejora el aislamiento térmico de los edificios.

En algunos países se están comercializando recubrimientos para muros con agregados de partículas de AS, teniendo algunos inconvenientes en su aplicación, ya que requieren mallas que los refuercen [5], razón por la que los investigadores están enfocándose en mejorar sus comportamientos mecánicos para que su aplicación no éste limitada.

c) Materiales compuestos homogéneos o heterogéneos, obtenidos con la combinación de aditivos durante el proceso de sintetizado y modificando la matriz de gel, dando diversas fases para obtener fibras, mantas y lanas [89]. Las investigaciones se han concentrado en obtener estos elementos fibrosos, los cuales sobrepasan la limitante de los monolitos y las partículas en cuanto a la flexibilidad y el comportamiento mecánico, razón por la que estos compuestos nuevos se han desarrollado con mayor fuerza en el mercado. Su producción se da durante el proceso de secado, en donde se vierten los elementos fibrosos y polímeros.

Ya como compuesto, el gel sililado se quiebra y las fibras permiten mantener una cohesión en todo el material, presentando flexibilidad macroscópica. El problema que presentan actualmente las mantas aislantes con el agregado AS es la liberación de polvo [5]. Los costos de los aislamientos con AS son veinte veces mayores que los que se utilizan actualmente. La justificación de emplearlo es el ahorro de espacio, la reducción de costos operativos de los edificios, la durabilidad y la resistencia química. El precio actual en el mercado está en 1500 dólares por metro cúbico, pero se estima que su comercialización en un futuro permitirá que estos valores se reduzcan; por lo tanto, su mayor

factibilidad actualmente está en utilizarse como agregado en sistemas compuestos híbridos que permitan su desarrollo y aprovechamiento [89].

2.5.2 Alternativas para mejorar la resistencia mecánica y los comportamientos del AS.

Los estudios en la aplicación del Aerogel en morteros, pastas y concretos, han demostrado que presentan siempre comportamientos de baja resistencia a la compresión, a la tracción y el módulo de elasticidad. Esto es en gran medida por la poca compatibilización de la red del Aerogel con otros materiales. La propiedad de contracción de su magnitud se estima que llega a presentar hasta el 50% de su volumen, por lo que algunos autores comentan que se puede aprovechar esta característica para mejorar su respuesta mecánica.

Otro de los problemas es que su superficie es hidrófuga, característica que puede ser tratada a través de tensos activos que modifican la reactividad para que la superficie del Aerogel pueda absorber agua. Se recomienda que esto se tome en cuenta al calcular el volumen de líquido para reponer el líquido en la mezcla y que no afecte la fluidez de la misma [5]. Se estima que se debe adicionar hasta un 0.1% para que no afecte las relación del aglutinante – agua [2], así como la hidratación del multi compuesto.

La presencia y crecimiento de agrietamientos puede reducirse a través de un super plastificante iónico que, además, puede ayudar a disminuir la incorporación del aire en la mezcla ocasionado por la incorporación de las partículas de Aerogel y el tenso activo utilizado en el proceso de hidrofiliación.

Se ha calculado que la inclusión del aire en la mezcla puede llegar a ser hasta de un 40% del volumen [2], condición que se relaciona directamente con la disminución de las resistencias mecánicas.

Se han realizado experimentos para modificar y fortalecer al Aerogel desde su misma sintetización, donde, además de utilizar diversos aditivos se han incluido refuerzos por medio de fibras, no sólo de forma nanométrica, sino también macroestructural. Se ha utilizado el polipropileno [79], aramida [90], fibras de vidrio [92], de fierro, cerámicas [93], de celulosa [91], que han demostrado ayudar en aminorar las fisuras presentadas y el incremento de la resistencia, sólo que aún en esta técnica no se han dado los comportamientos ideales.

A pesar de las características frágiles, las propiedades mecánicas del AS son muy prometedoras. Su buena compresibilidad puede usarse para absorber también energía cinética.

2.5.3 Aditivos surfactantes y tensoactivos para modificación superficial AS.

El tratamiento superficial de los materiales consiste en mejorar la resistencia mecánica y química de los compuestos, optimizar la dispersión del mineral en medios poliméricos, obtener menor viscosidad de la mezcla, mejorar las propiedades eléctricas y el curado de los materiales y, sobre todo, originar una adhesión mayor en la zona de interfaz, para aumentar la compatibilidad,

disminuir el ángulo de contacto de la superficie y aumentar la energía superficial de hidrófila a hidrófuga o viceversa, [141].

Los aditivos compatibilizantes son típicamente agentes tensoactivos que son empleados en diversos procesos de transformación de los plásticos con la intención de mejorar su rendimiento y modificar las características de la superficie de los materiales. Son promotores de la adhesión de sustancias químicas y, sobre todo, actúan en la zona de interfaz entre diferentes materiales, ya sean inorgánicos como el vidrio, los metales y los minerales, o bien, como sustratos orgánicos como los polímeros a los que se les mejora la humectación [142].

Los aditivos se incorporan en las matrices poliméricas por una variedad de métodos y en diversos puntos del proceso de fabricación. Los agentes acoplantes o de acoplamiento, promueven la adhesión entre polímeros y cargas inorgánicas mediante la formación de enlaces químicos estables, entre la matriz orgánica y la superficie de carga [141]. El tipo más común de agente de acoplamiento son los organosilanos llamados comúnmente silanos, que tienen la estructura general $\text{RSi}(\text{OR}')_3$, donde R es un grupo orgánico funcionalizado que se une a la matriz del polímero, por ejemplo: amino, epóxico, acrilato o vinilo) y R' es típicamente un metilo o etilo.

Los grupos metoxi o etoxi se hidrolizan a silanoles que reaccionan con los grupos hidroxilo de la superficie de la carga inorgánica, para formar enlaces oxano. El resultado es una mejora de las propiedades mecánicas y eléctricas [141]. Las cargas son típicamente tratadas previamente con una dispersión acuosa de silanos, se hacen reaccionar para continuar con la matriz del polímero

durante la formación del compuesto. El silano mejora la humectación durante la extrusión, reduciendo así la tensión superficial de la interfaz orgánica-inorgánica para una mejor dispersión de los compuestos.

Zhao-hui Liu, et al, en su investigación presentan dos problemas que percibieron al incorporar las partículas de AS en un mortero. Uno es la unión del aerogel con las partículas aglutinantes del mortero y el otro, el tamaño de las partículas que fácilmente se volatizan durante el proceso de mezcla; por lo tanto, en el primer caso se separa una parte del total de agua para configurar una concentración con una solución que tiene el propósito de buscar el acoplamiento del aerogel. Al líquido se le agregó el Silano (KH550), que tiene la función de ser agente de acoplamiento y mejorar la inclusión del AS. Se realizó la mezcla en seco del aglutinante (cemento), con la arena y la MS durante dos minutos, para luego añadirle el agua a los 3 minutos [143]. Al final se agrega el pretratamiento de las partículas de aerogel, haciéndolo lentamente para obtener la pasta y pasarla a los moldes.

En materiales cementantes se tiene reportado que los silanos mejoran la resistencia y la durabilidad, al reducir el tamaño de los poros y con ello la inclusión del transporte de sustancias químicas agresivas [144]. Otro de los aditivos promotores de la adhesión son reactivos que se utilizan como compatibilizadores; sobre todo entre materiales poliméricos. En estos tipos de aditivos se encuentran los oligómeros o polímeros orgánicos reactivos, como los polímeros termoplásticos (polietileno, polipropileno y otros), que contienen grupos órgano-funcionales entre los que se encuentran los copolímeros que contienen bloques

que funcionan en segmentos poliméricos, con diversos parámetros de solubilidad que se ajustan a los componentes que se van adherir o compatibilizar. Como resultado es que se refuerza la adhesión por las interacciones atómicas producidas por Van der Waals, interacción dipolar y otras fuerzas atómicas [141].

Estos aditivos se han estudiado en métodos de curado químico del concreto [145], como agentes de procesamiento interno que reducen la contracción, definiéndolos como polímeros absorbentes que conducen a almacenar suficiente agua interna y distribuirla adecuadamente para provocar un curado interno en todas las partes internas del concreto, para conservarlas saturadas y libres de tensión propia [146], para así lograr la hidratación continua del cemento y alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

Se estudia el copolímero compuesto de tres bloques PEO-PPO-PEO de poli (óxido de etileno) (PEO) y Poli (óxido de polipropileno) (PPO). El block de PEO es de mayor contenido, por lo que otorga a todo el compuesto su condición hidrofílica y lo hace soluble al formar las interfaces con agua, mientras que el block de PPO es hidrofóbico y no es soluble [147], así se forma el material anfifílico.

Los polietilenglicoles (PEG) y los polipropilenglicoles (PPG), son humectantes que tienen dos funciones, retienen y preservan la humedad, razón por la que se utilizan en muchos productos cosméticos [147].

CAPÍTULO 3

MÉTODO DE EXPERIMENTACIÓN

Dentro del plan experimental para este trabajo, se propusieron **cinco etapas**: 1) Caracterización y propiedades micro y macroestructurales, 2) Estudios preliminares y de diseño de mezclas, 3) Estudio de selección de tamaño de partícula y aditivo modificador, 4) Estudio de proporción del AS y dosificación del aditivo COP y 5) Modelación y simulación energética que permitieron evaluar, analizar y determinar las características, cualidades, propiedades, comportamientos y aplicaciones del material en la construcción, su factibilidad, beneficio – costo por su utilización para obtener resultados que comprobaran la hipótesis de investigación.

Etapa I

3.1 Caracterización y propiedades micro y macroestructurales.

En esta etapa se analizaron individualmente los materiales o componentes utilizados, con el fin de conocer la composición química, mineralógica, características microscópicas que determinan las propiedades macroscópicas [148], que permitieron comprender la respuesta, función y comportamientos del material, todo bajo las normativas determinadas para cada ensayo y proceso, con el fin de obtener la justificación de su empleo. Esta etapa de caracterización consiste en:

-
- a) **Análisis de propiedades físicas.** Distribución de tamaño de partículas **(DTP)** para verificar el cumplimiento de la normativa ASTM C989; Densidad por medio del picnómetro de helio.
- b) **Análisis de la composición química.** se determina la composición química por medio del Análisis de Fluorescencia de Rayos X **(FRX)**. Se identificaron los componentes químicos elementales para corroborarlos y compararlos con otros materiales cementantes o algunos utilizados en otras investigaciones, así como para obtener datos para determinar sus reacciones, cambios químicos y algunas propiedades como la basicidad y el coeficiente de calidad, que determinan el grado de reacción de algunos materiales.
- c) **Análisis de características mineralógicas.** Se estudió las características amorfas y cristalográficas de los materiales por medio de la difracción de rayos X (DRX).
- d) **Análisis microscópico.** Por medio de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la espectroscopia de dispersión de energía (EDS), se obtuvieron las imágenes de las superficies, su topografía y composición para la caracterización superficial de los materiales.

Técnicas de Experimentación

3.1.1 Distribución del tamaño de las partículas (DTP).

Se realizó el estudio por medio de difracción láser, que consiste en analizar la luz estática dispersa [149] o difractada de forma indirecta, debido a que este método no mide el tamaño directamente de la partícula [150], sino que se calcula mediante una propiedad secundaria (patrón de difracción), que es producida a través de una luz láser (monocromática) cuando es proyectada para que incida sobre la partícula, provocando la difracción de luz en diferentes direcciones y sobre sus bordes, produciendo fenómenos, ángulos y patrones de intensidad de difracción que fueron analizados y el resultado reportado [149,151], **Figura 20**.

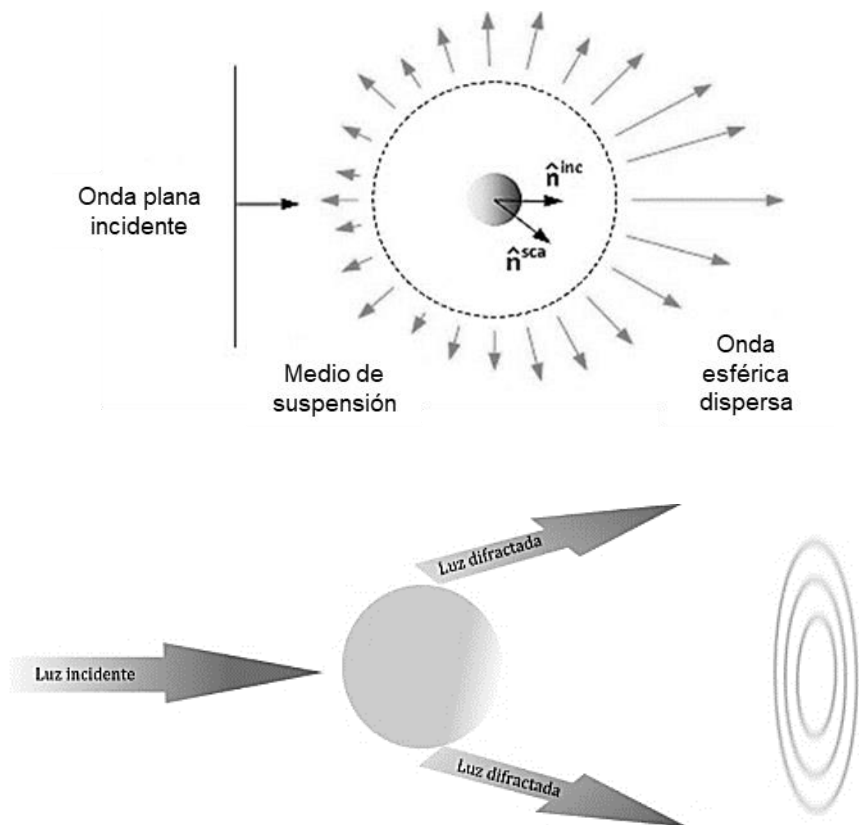


Figura 20. Esquema de difracción de luz teniendo como obstáculo una partícula esférica [152].

El patrón de intensidad depende del tamaño que se tenga. Una partícula dispersa luz frontalmente a un determinado ángulo, inversamente proporcional a su tamaño, por lo que las partículas pequeñas dispersan la luz a grandes ángulos y las grandes preferentemente en ángulos pequeños, dando lugar a lo que se conoce como anillo de Airy [151] que son frentes de onda esféricos cuya interferencia produce los fenómenos que se analizan por medio de este método [149], **Figura 21.**

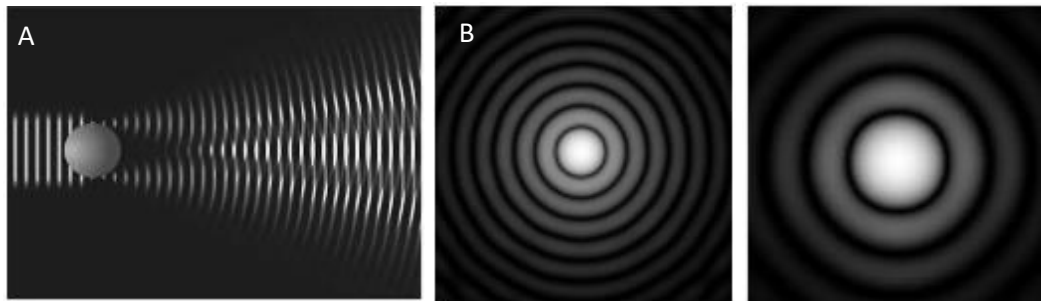


Figura 21. A) Difracción láser de una partícula esférica, B) Patrón de difracción de partículas grandes y C) Patrón de difracción de partículas pequeñas disco de Airy [149].

Cada uno de los diferentes tamaños de partículas tienen patrones y longitud de dispersión que son definidos por diferentes teorías que se emplean cuando se miden las intensidades de la luz dispersada alrededor de la muestra [7]. Para partículas con diámetros mayores se aplica la aproximación de Fraunhofer A), para las medianas se debe utilizar la evaluación de Mie B) y a las muy pequeñas se les denomina dispersión de Rayleigh C) donde la luz dispersada es más débil y casi isótropa, ósea, que tienen uniformidad en todas las direcciones, [149], **Figura 22.**

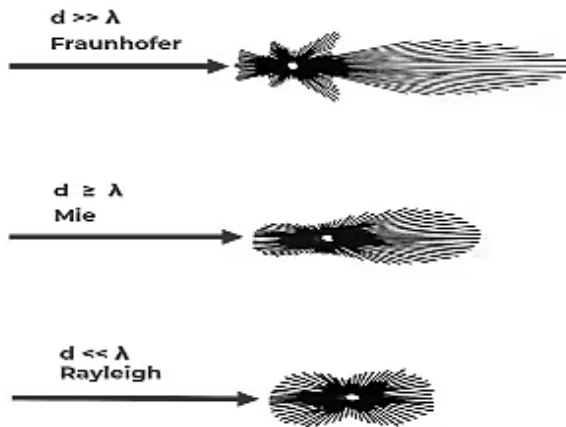


Figura 22. A) Difracción láser de una partícula grande, B) Difracción partícula mediana y C) Patrón de difracción de partículas pequeñas [149]

El patrón de dispersión es generado por la superposición de luz dispersa de muchas partículas de diferentes tamaños simultáneamente, por lo que a este método se le conoce como medición de conjuntos [153], como si la evaluación se realizara a una nube de partículas [154], obteniéndose resultados precisos en un intervalo de medición muy amplio, desde escalas de 10 nm hasta los cuatro milímetros [150-149].

Las partículas se suspenden en alcohol y circulan a través de un haz ampliado de luz láser, que se dispersa hacia una lente que la enfoca en un detector para luego calcular el tamaño, utilizando una ecuación integral a partir de los datos recopilados de la luz difractada [153]. Algunos autores mencionan que es inadecuada esta técnica, sobre todo cuando se emplean materiales con formas complejas [155-156], pues estos métodos asumen que las partículas son de forma esférica y no de forma irregular, como el caso del AS [150], pero realizarlo por medio de este método es apropiado y conveniente, por la complejidad de hacerlo a través de otra técnica.

El análisis de distribución de tamaños de partículas divide en porcentajes el material que compone a la muestra homogénea, para integrar una base de datos que son expresados en histogramas o diagramas de frecuencia relativa, donde se muestra la recurrencia que tiene un determinado tamaño de partícula o se representan en forma acumulativa los porcentajes de materia que pasaron en un determinado tamaño, **Figura 23**.

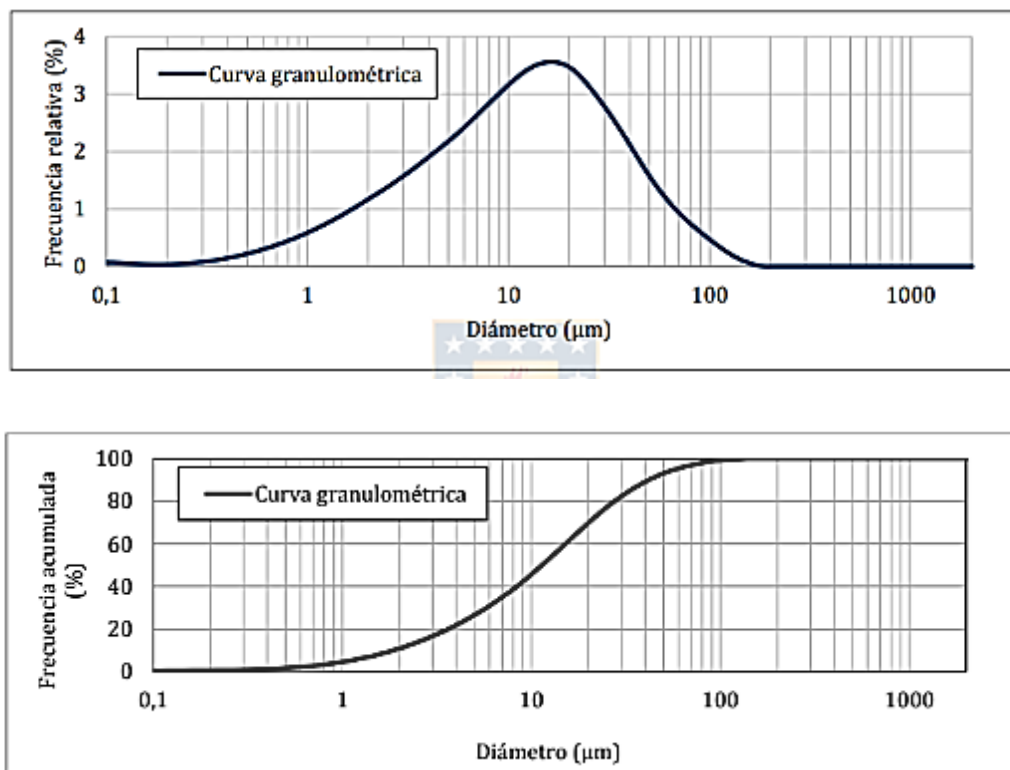


Figura 23. Diagramas de frecuencia de tamaño de partícula y curvas granulométrica [151].

Se obtuvieron los valores de distribución de tamaño de partículas (DTP) de cada uno de los materiales empleados en el MC, y se consideró para este estudio, la evaluación de cuatro tamaños de partículas de AS, con el fin de

verificar su clasificación como agregado dentro del mortero; por lo tanto, el promedio de los tamaños se obtuvo de tres corridas de 20 segundos, utilizando el equipo Microtrac S3500 de difracción láser, que obtiene mediciones precisas y de alta calidad para materiales en polvo [157], **Figura 24**.



Figura 24. Equipo Microtrac S3500 de difracción láser para medición de distribución de tamaños de partículas.

3.1.2 Densidad real por picnómetro de Helio.

La densidad, se consiguió a través de la masa y el volumen obtenidos por el equipo picnómetro de Helio, **Figura 25**. Se utilizaron tres muestras de cada material, para promediar y obtener la densidad aparente, que, en el caso del AS, se utilizó para determinar la densidad real.



Figura 25. Picnómetro de Helio, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León.

La utilización de la picnometría permite determinar la densidad relativa de los materiales sólidos o pulverulentos, mediante el desplazamiento de Helio. Esta técnica de caracterización de materiales está fundamentada en el principio de Arquímedes. El picnómetro es un recipiente que contiene un volumen estable y determinado, que es llenado con un fluido de densidad conocida, en este caso Helio. Al introducirse la muestra cuya densidad o peso se quiere conocer, se desplaza cierto volumen del fluido que es equivalente al volumen de la muestra objeto de estudio, que, junto con la masa o peso de la muestra calculadas con exactitud [158], permite determinar su densidad o su peso específico respectivamente.

En cuanto a los fundamentos físicos, la densidad es una propiedad de los materiales que se obtiene dividiendo el valor de su masa entre el volumen que ocupa, se puede definir mediante la fórmula:

$$v/m=p \quad (1)$$

Donde m es la masa y v el volumen, para la densidad (ρ). Dentro del sistema Internacional se asigna la unidad de kg/m^3 , pero también es muy frecuente expresar la densidad en g/cm^3 del sistema cegesimal [158].

El funcionamiento de los picnómetros de gas se basa en la Ley de Boyle-Mariotte, aplicada al comportamiento de gases ideales, que son todos aquellos cuyas moléculas están libres totalmente sin alguna interacción entre ellas, además de que su movimiento es de forma rectilínea, chocando entre sí contra las paredes del recipiente y se puede mencionar que entre las moléculas no se tiene ninguna fuerza de atracción, las colisiones entre ellas son elásticas y el número de moléculas es despreciable, comparado con el volumen total [158].

El Helio tiene átomos esféricos con diámetros de 0.20 a 0.23 nm, no presentan fuerzas de Van der Waals, por lo tanto, tienen nula capacidad de adsorción e interacción en la superficie de los sólidos, además de que puede penetrar en los poros de tamaño inferior a los 0.3 nm, que hace que la presión del gas y el volumen que ocupa el sólido en estudio pueda calcularse con facilidad [158], por esta razón es que el Helio es un gas apropiado para calcular el volumen del esqueleto sólido de la mayoría de los materiales.

3.1.3 Fluorescencia de rayos X (FRX).

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica utilizada para la caracterización de los materiales, que tiene como objetivo, conocer su composición elemental y tiene un límite de detección dentro del intervalo de partes por millón (ppm) [152].

La fluorescencia se obtiene en el nivel atómico y ocurre cuando una energía alta es conducida por los fotones generados por una fuente de rayos X, transfiriendo esta energía a un electrón de un átomo en una capa interna dentro del material, provocando su excitación, movimiento, desplazándolo ligeramente de su órbita hasta formar vacantes de electrones en el átomo, dejándolo inestable [152] [159]. Mientras tanto, un electrón de un orbital externo ocupa la vacante en el orbital interno, emitiendo energía en forma de rayos X fluorescentes secundarios, de una energía o radiación más baja llamada fluorescencia, que es exclusiva para cada elemento y para la diferencia de energía entre los orbitales [159], los fotones emitidos son menores que los absorbidos y únicos para cada elemento [160], **Figura 26**.

La radiación emitida es única, así como la distribución de energía atómica de un elemento particular dentro de un material. Se puede tomar como una huella dactilar atómica por la emisión de fluorescencia en distintas frecuencias, en diferentes intensidades que son detectadas y comparadas con los rayos X de muestras conocidas, para así obtener la concentración de cada elemento por medio de la velocidad a la que se emiten los rayos X secundarios fluorescentes detectados por medio de un espectrómetro [152].

La FRX utiliza radiación electromagnética de energía fotónica, en la banda de los rayos X (>0.1 keV). El electronvoltio (Ev) es la medida con la que se contabiliza la variación de energía que experimenta un electrón al moverse de un punto u orbital de energía mayor, hacia otro orbital de energía más baja. Es una unidad muy pequeña, por lo que frecuentemente se emplean múltiplos como keV (kilo electronvoltio 10^3 eV) [161].

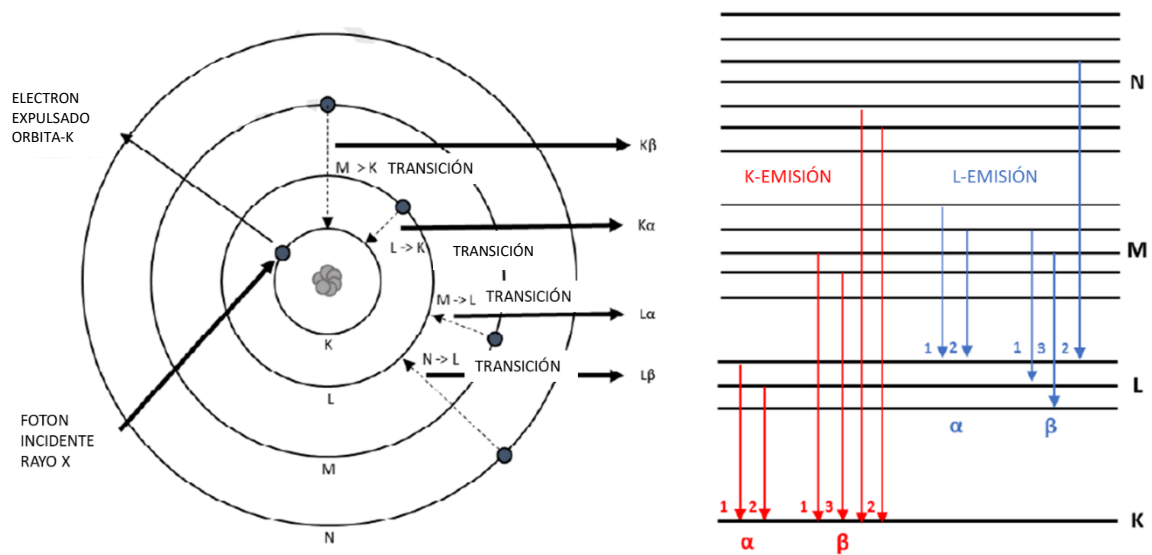


Figura 26. Mecanismo de fluorescencia de rayos X en un átomo [152].

Los rayos X pueden ser dispersados o absorbidos por los electrones de los átomos provocando el efecto fotoeléctrico [27]. Cuando los analitos tienen la capacidad de absorber la energía, se les conoce como fluoróforos y pueden generar luminiscencia que es el proceso de absorción y posterior emisión de radiaciones por átomos o moléculas excitables. A este fenómeno físico se le conoce como fotoionización, que es cuando un fotón incide sobre un átomo, ion o molécula [160], dando lugar a la expulsión de uno o más electrones.

Para el procedimiento se toman las muestras en forma de polvo fino, correspondientes a morteros que fueron tomados de fragmentos de muestras ensayadas en pruebas destructivas de resistencia a la compresión, mismas que tuvieron un proceso de interrupción de hidratación a diferentes edades, así como el secado a una temperatura de 40°C en un tiempo de 24 h, [162].

Las fracciones del material se muelen en un molino Herzog, en un tiempo de 2 minutos, para obtener una proporción de 10 +/- 0.1 g de polvo fino. Esta proporción se mezcla con 1 g de cera de marca CEREOX y se homogenizan los polvos con una espátula. La cera se utiliza para lograr la compactación y evitar que la muestras se desmoronen durante las mediciones [162-163].

Se prepararon las muestras en forma de pastillas (pellets), con moldes de Aluminio de 40 mm de diámetro y 4 mm de espesor [163], para posteriormente comprimir la pieza por medio de una prensa hidráulica semiautomática Atlas Power T25 Specadd, presionando a 10 t en un tiempo de un minuto.

Se empleó el espectrofotómetro de fluorescencia rayos X PANalytical Epsilon3-XL [164], equipo de sobremesa que cuenta con un porta-muestras de 10 posiciones que permite girar la muestra durante la medición, con un voltaje de 2 a 50 keV, generando una atmósfera de Helio. La medición se realizó en un tiempo de 16 minutos aproximadamente, obteniendo 5 barridos o zonas a estudiar y cada pastilla se midió una vez, **Figuras 27 y 28**.

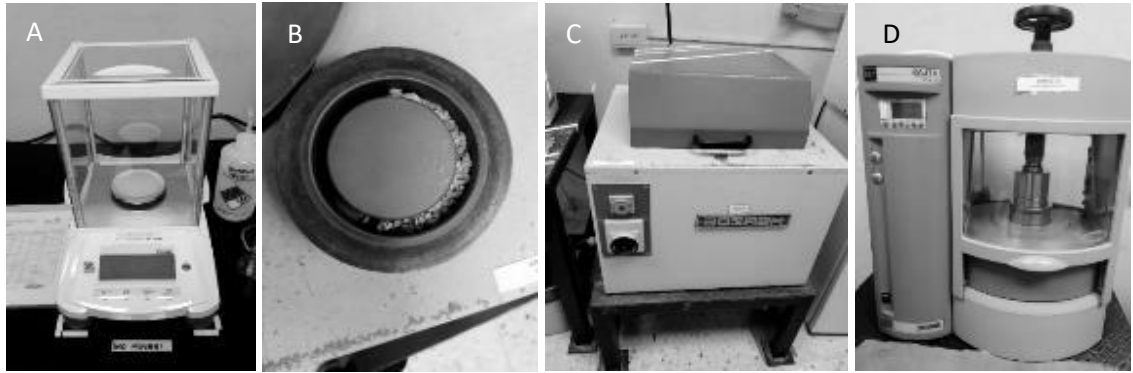


Figura 27. A) Balanza analítica PX224 Pioneer Plus Ohaus, B) Fragmentos de mortero en recipiente de molienda, C) Molino Manual Herzog, D) Prensa hidráulica Atlas T25 Specadd.



Figura 28. A) Pellets de mortero y molde de aluminio, B y C) Espectrómetro Epsilon 3XLE. EDXRF.

Por medio de FRX se determina la composición química esencial a través de datos, reacciones y cambios químicos, para corroborarlos y verificar que su composición sea similar a los estudios realizados con estos materiales. Se obtuvieron los valores de composición de la EAH que son indispensables para obtener un material con módulo de basicidad $M_b = >1$ y coeficiente de calidad $k_q = >1.4$.

$$M_b = (\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \text{ y } K_q = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) \text{ [27].}$$

3.1.4 Difracción de rayos X (DRX).

Es la técnica analítica para la caracterización de materiales cristalinos de grano fino, que tiene como propósito obtener datos cuantitativos sobre las propiedades estructurales de los cristales y determinar las fases de los compuestos por medio de un análisis cualitativo.

Todo se basa en la capacidad de los cristales de reflejar los fonones de rayos X que inciden sobre los átomos del volumen irradiado, estudiando cómo se dispersan en muchas direcciones [165], cómo son reflejados en diferentes planos cristalinos identificando la estructura atómica o molecular del material analizado, generando un patrón único de interferencia que permite conocer su composición en fase cristalina [165].

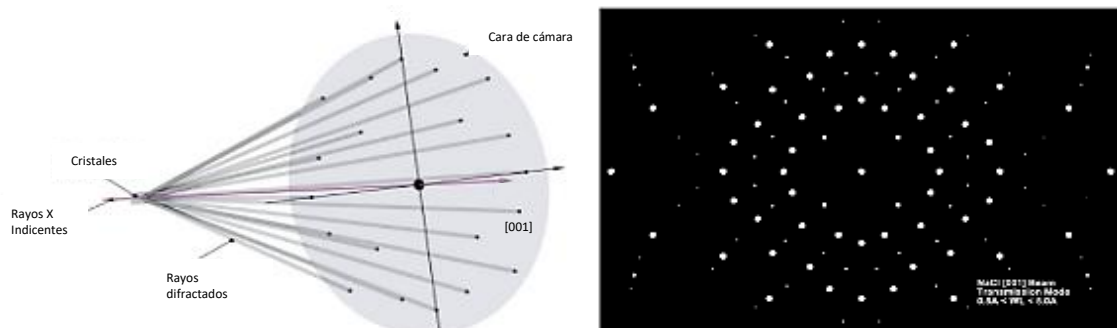


Figura 29. DRX moderno del cristal de cloruro de sodio, de forma cuádruple simétrica y cúbica [166].

Con los patrones de difracción y las configuraciones específicas se obtiene información que, por medio de un análisis cuantitativo y cualitativo, definen las fases cristalinas de los materiales que permiten la caracterización de los elementos sólidos, su tamaño, su forma, su orientación, sus deformaciones [167], los parámetros de red, el espacio y su estructura química [165], **Figura 29.**

Al reflejar la difracción de rayos X en los materiales cristalinos, se manifiestan patrones a través de picos con intensidades variables en diferentes ángulos de difracción y posiciones que determinan la simetría y el tamaño de celda unitaria, como lo define la ley de Bragg [168], donde se expresa que las relaciones geométricas entre las longitudes de onda de los rayos X (λ), el espaciamiento interplanar de los átomos (d), los planos etiquetados como (h, k y l) definen el espacio tridimensional y el ángulo de incidencia (θ) sobre el plano de átomos en la celda unitaria durante de la difracción ($n\lambda = 2d\sin\theta$) [166].

Las sustancias cristalinas actúan como rejillas de difracción tridimensionales, mostrando los espaciamientos entre los átomos, provocando diagramas de configuraciones. Cada átomo produce un frente de onda esférico, a veces se anulan las ondas y otras veces se refuerzan en tres dimensiones a través del ángulo de incidencia θ , como una huella dactilar única que permite identificar cada mineral, **Figura 30.**

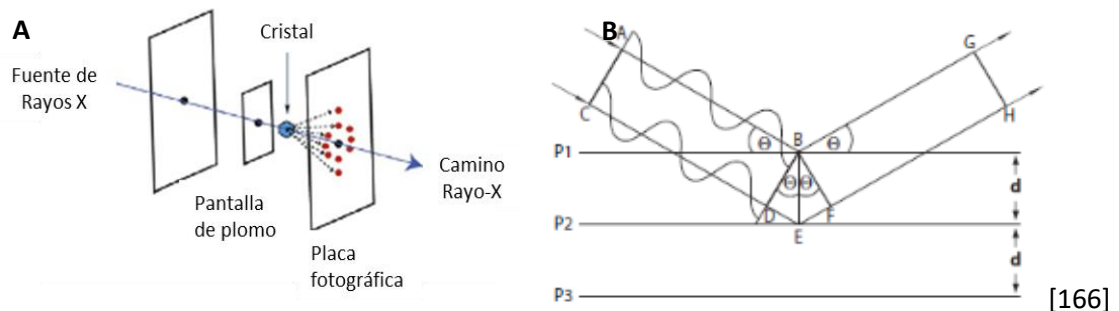


Figura 30. A) Proyección de rayos X a través del Cristal de Sulfato de Cobre de Laue 1912. B) Dos ondas de rayos X, reflejadas en dos planos separados por una distancia d y se reflejan en un ángulo θ , para proyectarse en ese mismo ángulo [21,24].

Los rayos X son producidos en un tubo de rayos catódicos con un filamento para producir electrones que son acelerados hacia un objetivo aplicando alto voltaje para impactar los electrones del material. Esto se realiza al vacío para desalojar los electrones de la capa interna y provocar vacantes que serán ocupadas por los electrones de las capas externas.

Los rayos X son monocromáticos, con un intervalo de onda que depende de la aceleración de los electrones que golpean el objetivo, así como la radiación que se desprende es específica del mismo elemento analizado. La radiación más común es la radiación $K\alpha$, con electrones que se transmiten en las capas L a K y varían de otros por la longitud de onda [166], mientras la radiación copper $K\alpha$ es la radiación más común utilizada para geología, siendo el Cobre un material de conducción eficiente.

Las mediciones se realizan a través de intervalos que consideran los ángulos de análisis; por ejemplo, los cementos van de 7 a $70^\circ 2\theta$ para $CuK\alpha$ [168], **Figura 31** y **Figura 32**. Las intensidades de los picos manifiestan la naturaleza y la disposición que tienen los átomos en la celda unitaria del material cristalino, por tal motivo, el DRX identifica patrones de posiciones e intensidades que caracterizan diferentes estructuras cristalinas [168]. Las ondas de los rayos X son medidas en Angstrom (\AA) y se miden en un intervalo de 10 a 0.1\AA [166].

El análisis de fase cualitativa es la identificación de los picos, comparándolo con una base de datos que contiene los patrones de fases conocidas, información que se encuentra en archivos de difracción de polvo publicado por el Centro Internacional de Datos de Difracción o ICSD (Inorganic

Crystal Structure Database), en combinación con datos químicos o de categorías que permiten realizar una comparación de las posiciones de los picos y sus intensidades; se identifican así los picos principales y sus concentraciones [166], las fases menores e hidratos a través de las reflexiones y las ondas de dispersión para encontrar coincidencias.

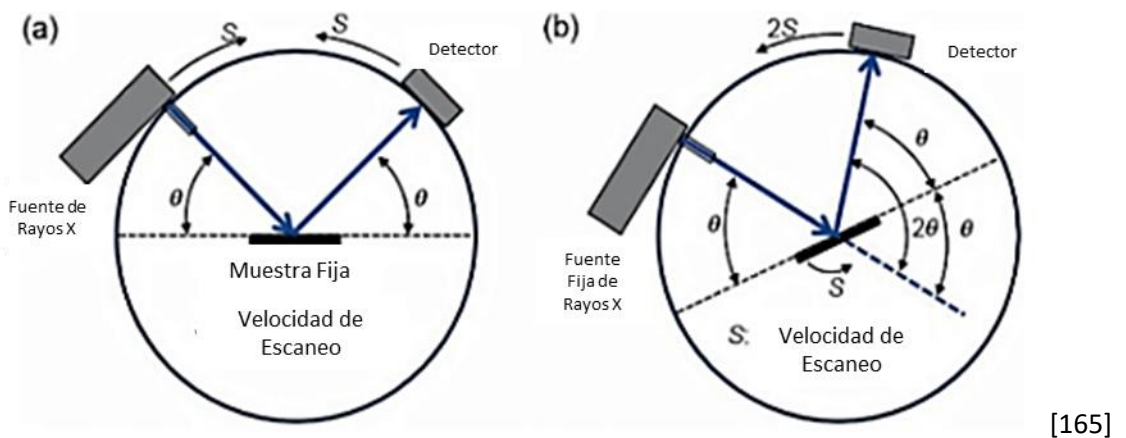
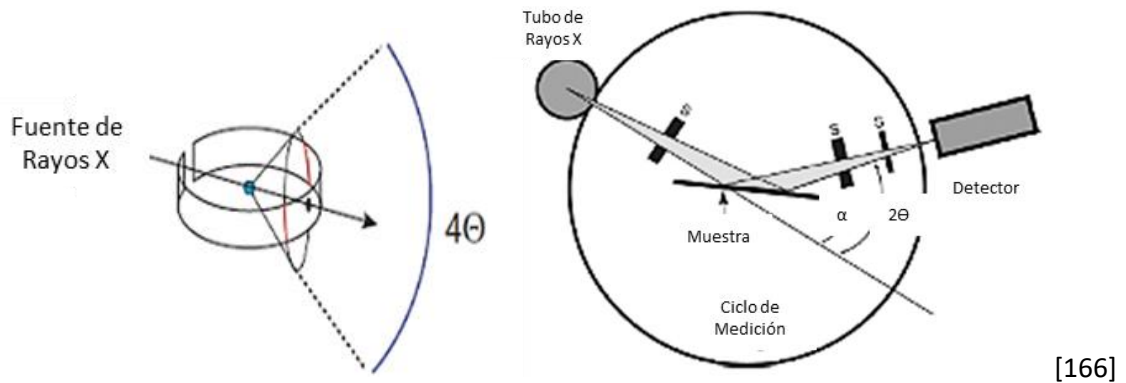


Figura 31. Diagrama que muestra la producción de los patrones de polvo de difracción donde los reflejos de rayos X forman un cono de ángulo 4θ [166]. a) Representación de la reflexión en θ - 2θ para la difracción de polvos, que son proyectados a través ranuras, antes y después de golpear la muestra que al estar en un soporte gira en un ángulo de θ , b) al igual que el detector se mueve alrededor del círculo de medición en un ángulo de 2θ dando la geometría que establece la ley de Bragg.

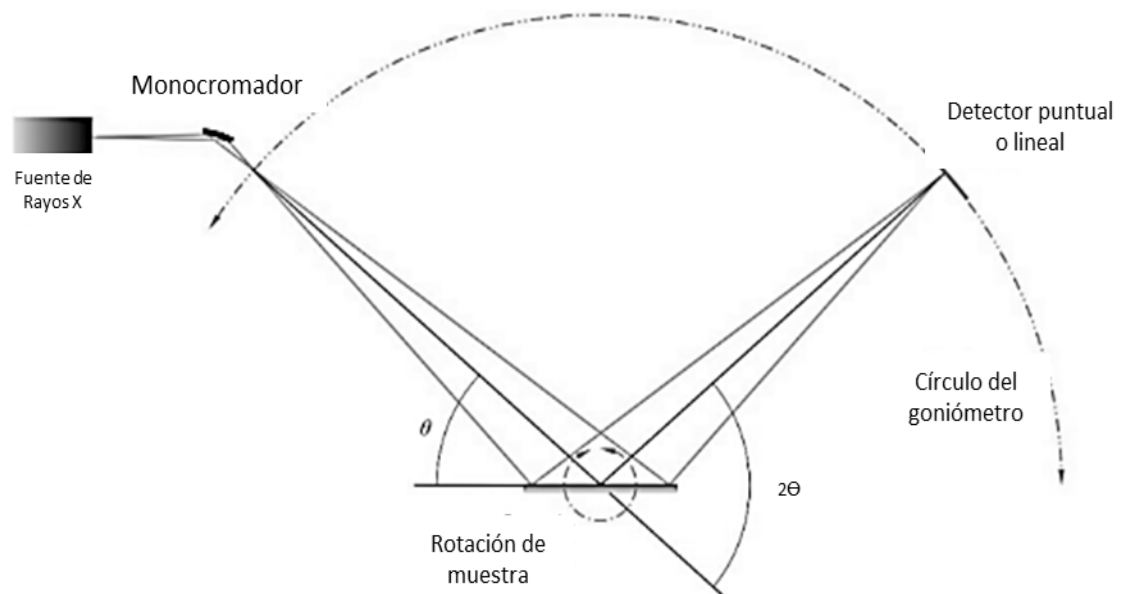


Figura 32. En la imagen se muestra la rotación del sensor, los ángulos de giro e inclinación [169].

La fase cuantitativa es la que cuantifica la composición de las fases [168], los minerales que están presentes y su proporción en la mezcla, la intensidad y la forma [166], el tamaño de la celda unitaria, los parámetros de celda relacionados con el perfil del pico determinando su densidad, el volumen, el peso y hasta el cálculo de las formas amorfas o no identificadas que se obtienen sumando el total del peso de todos los componentes cristalinos y, por diferencia, se obtiene el peso total del material amorfo, que regularmente se distingue por su poco o nulo orden, como lo presenta la fase amorfa del Sílice (SiO_2), material que puede existir también en forma de cristales con espaciamiento molecular y orientación determinada y que permanece constante convirtiéndose en cristal de Cuarzo [169].

Para esta investigación se utilizó el difractómetro de tercera generación, PANalytical Difractómetro (Modelo Empyrean, Cuka radiación, 40 Kv), equipo del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Las mediciones se realizaron con los parámetros de conducción de $2\theta = 6$ a 72° , con un intervalo de 0.026° [27,170-171], a través del método de muestras de polvo fino, que cumple las normativas internacionales. Para generar la radiación se utilizó el Cobre (copper $K\alpha$) con un goniómetro para la detección de Theta en un radio de 240 mm y un valor máximo de $-11^\circ < 2\theta < 168^\circ$. Su linealidad es con referencia al ángulo 2θ , igual o menor que $\pm 0.01^\circ$ y generador de 4kv.



Figura 33. Difractómetro Empyrean PANalytical.

Para el procedimiento se tomaron fragmentos de pastas y morteros ensayados en pruebas de resistencia a la compresión, a las que se les interrumpe el proceso de hidratación y sus efectos, esto a través de un proceso de secado

de las muestras donde se utiliza un solvente que sustituye el agua de la estructura del mineral, obteniendo muestras deshidratadas.

En esta investigación se utilizó el alcohol isopropílico como solvente orgánico que reemplaza el líquido. Este proceso de intercambio es una manera suave de eliminar el agua de la microestructura, sin alterar las fases de los minerales, recomendando realizar este proceso durante una semana y posteriormente evaporar el solvente, secándolo a una temperatura de 40°C en horno, en un tiempo de 24 horas [168].

El mineral se muele para obtener un polvo muy fino y homogéneo [168,172], que permite obtener una cantidad de granos en orientaciones aleatorias [172] y que los planos atómicos estén dispuestos de manera diferente, para que el haz de los rayos X pueda detectarlos. Normalmente se requiere un gramo de polvo que se coloca en un molde de acero inoxidable, el cual se comprime para tener una superficie plana y analizarla fácilmente [168].

3.1.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS).

El microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés), utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen que permite la observación y la caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos [173]. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diversos detectores recoger los electrones que se generaron e interactuaron con la superficie del material, para

crear una imagen que refleja las características superficiales y los aspectos morfológicos de zonas microscópicas, pudiendo proporcionar información de formas, texturas y composición química de sus constituyentes [173-174].

El emisor forma una columna de electrones incidentes con cierta aceleración (hasta 30 keV), que mediante un vacío se conduce a través de diferentes lentes electromagnéticas como un sistema de deflexión, que permite manipular el haz de electrones para formar un barrido de la superficie del material, [175].

Cuando los electrones inciden con la superficie se generan diferentes señales: electrones secundarios, electrones retro-dispersados y rayos x, entre otros, que recogen la información que describe la morfología y composición química superficial de la muestra, aspectos que pueden ser observados por medio de imágenes de alta resolución y magnificaciones de 4 a 20 nm, [175].

Los Electrones secundarios producen imágenes de apariencia tridimensional de alta resolución SEI (Secondary Electron Image) y se generan cuando un electrón pasa muy cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionando la suficiente energía a uno o varios de los electrones interiores para saltar fuera de la muestra.

Estos electrones son de muy baja energía, por debajo de 5eV, por lo que se deben encontrar muy cerca de la superficie para escapar; por esta razón es que proporcionan una valiosa información topográfica y morfológica superficial y son los utilizados principalmente para la microscopía de barrido [174,176].

Los Electrones retro-dispersados se producen cuando un electrón del haz choca frontalmente con el núcleo de un átomo de la muestra, siendo repelido en sentido contrario fuera de la misma y se evalúa la intensidad de dicho efecto que varía proporcionalmente con su número atómico. Esta técnica se utiliza para obtener un mapa con información sobre la composición de las superficies de los materiales, además de generar imágenes BEI (Backscattered Electron Image) con diferente brillantez, según su composición química superficial [174,176].

El microscopio tiene un detector de energía dispersiva EDS de rayos X (Energy Dispersive Spectrometer), que proporciona información analítica de un volumen considerable de la muestra [174], la espectrometría detecta cualitativamente los rayos característicos de los elementos químicos presentes en la superficie de la muestra, mostrando un análisis semicuantitativo de la composición química detectada [174,176], **Figura 34.**

Otro tipo de electrones producidos son los llamados Auger, que se forman cuando un electrón secundario es expulsado del átomo y otro electrón más externo puede saltar hacia el interior para llenar este hueco. El exceso de energía provocado por este desplazamiento puede ser corregido emitiendo un nuevo electrón de la capa más externa. Esta técnica se utiliza para obtener información sobre la composición de pequeñísimas partes de la superficie de la muestra.

La preparación de las muestras es relativamente sencilla. Es necesario que la muestra sólida se encuentre libre de humedad y sea conductora o bien, se recubra con una capa delgada de Carbón o metal como el Oro, para conseguir su propiedad conductiva [174]; sin embargo, las muestras conductoras pueden ser revisadas sin ningún tipo de recubrimiento.

Se utilizó el método de polvos realizada con algunos fragmentos de cubos triturados durante el ensayo de compresión. Se sumergieron en alcohol isopropílico en un período de 72 h, con el propósito de detener el proceso de hidratación y fraguado de las muestras. Posteriormente se secaron durante 24h a una temperatura de 40° C, para retirar el alcohol [109].

Se elaboraron pastillas con resina epóxica, las cuales se llevaron a un proceso de pulido, para posteriormente recubrirse con oro paladio, para así obtener las imágenes amplificadas a 50, 100, 1000, 2000 y 5000 aumentos [25,27], con una distancia de 15 a 27 mm y un voltaje de 15Kv, que permitió obtener imágenes aumentadas de las superficies para observar la compatibilización de los materiales.



Figura 34. Equipo SEM modelo JS6510LV, Instituto de Ingeniería Civil, UANL.

Etapa II

3.2 Estudios preliminares y de diseño de mezclas.

Los materiales empleados para el compuesto son: AN (CaSO_4) en fase II obtenida por calcinación del sulfato de Calcio comercial semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) (*Ver Anexo I a*) a una temperatura de 500°C durante 6 horas; sulfato de Potasio (K_2SO_4), hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), EAH obtenida durante la fabricación del acero, con los requerimientos indicados en la ASTM C989, cemento Portland comercial con las características descritas en la ASTM C150, la MS del tipo comercial no densificada con las características físicas y químicas descritas en la norma ASTM C1240, AS en cuatro tamaños de partículas producidas por Cabot Corporation con sede en Boston Massachusetts, EE.UU., 1) LUMIRA® A1000 (A1000), 2) ENOVA® IC3120(A3120), 3) ENOVA® IC3110(A3110) y 4) ENOVA® IC3100(A3100)(*ver Anexo I b,c,d*) y *e*) y arena sílica con especificaciones recomendadas en ASTM C778.

Para la modificación superficial se utilizó el aditivo 2-Aminopropil Polietilenglicol-bloque-polipropilenglicol-bloque-polietilenglicol (PEG-PPG-PEG Pluronic®) de la marca Sigma Aldrich Química, S de RL de CV (COP) (*Ver Anexo I f*) y el agente de acoplamiento silano (S) también conocido como 3-aminopropiltrióxido de silano (APTS o trióxido de silano), *Ver Anexo I g*).

Se realizaron experimentaciones para obtener las muestras con las condiciones de finura, fluidez, dosificaciones y proporciones que se establecieron para este estudio; además de determinar el proceso de homogenizado de

materiales para la integración de las partículas de AS y el aditivo modificador. Por último, calibrar el equipo para las experimentaciones térmicas y asegurar la veracidad de los resultados.

3.2.1 Obtención del multi compuesto.

El compuesto AN+EAH+MS es el elemento base y matriz, que al agregarle el AS y los aditivos para la modificación superficial se obtuvieron las variantes para comparar sus propiedades y reacciones; su composición es del 70% de AN, 25.5% de EAH y 4.5% de MS; se agregaron activantes para la AN de 3% de K_2SO_4 y 4% de $Ca(OH)_2$, además del 7% de cemento para la activación de la EAH [27]; en cuanto a la arena sílica 2.75% de los cementantes, con las características especificadas en la Norma ASTM C778 [177] y con respecto al agua (a), se empleó destilada con la dosificación recomendada del 0.45 con respecto a los cementantes (0.45 a/cementantes) [27].

3.2.2 Proceso de homogenizado y disolución del Aditivo.

Para la inclusión del AS en la mezcla, se realizó un estudio del homogenizado analizando visualmente la mejor forma de incorporarlo en el mortero. Se observó que en el agua no se dispersan las partículas de AS por su propiedad hidrófuga a pesar de agitarlo durante un tiempo prolongado. Al mezclar el AS con la arena sílica se separan los materiales por la diferencia en el peso y densidad. La forma más conveniente de integrarlo es con los materiales cementantes, a diferencia de la recomendación de Hui Liu, que menciona hacerlo con el líquido de la mezcla [143], **Figura 35. 1. A) y B).**

El proceso de homogenizado se realizó por medio de un molino de rocas de doble vaso, con tambor giratorio de la marca Chicago Electric Power, al que se le sustrajeron las piedras que se emplean para el molido en este equipo y así aprovechar solo su movimiento rotativo para homogenizar los cementantes con el AS. Se realizaron revisiones a diferentes tiempos 30 s, 60 s, 180 s y 5 minutos, para observar la homogenización y la posible degradación del tamaño de partículas del AS, **Figura 35. C).**



Figura 35. A) Partículas de AS sin homogenizar, B) homogenizadas en los cementantes, C) Molino de rocas para homogenizado.

Otra de las condiciones que se debe estudiar y evaluar, es la conservación del tamaño de partícula del AS durante el proceso de homogenizado de los materiales; para esto se siguió el proceso de inclusión del AS descrito por Pingua Zhu [8], donde sugiere que la mezcla se realice en dos pasos; el primero todos los cementantes en forma seca, donde se agregan las partículas del AS, para posteriormente pasar al segundo paso, donde se añade el agua requerida para el mortero y los aditivos empleados para la modificación superficial del AS, **Figura 36.**

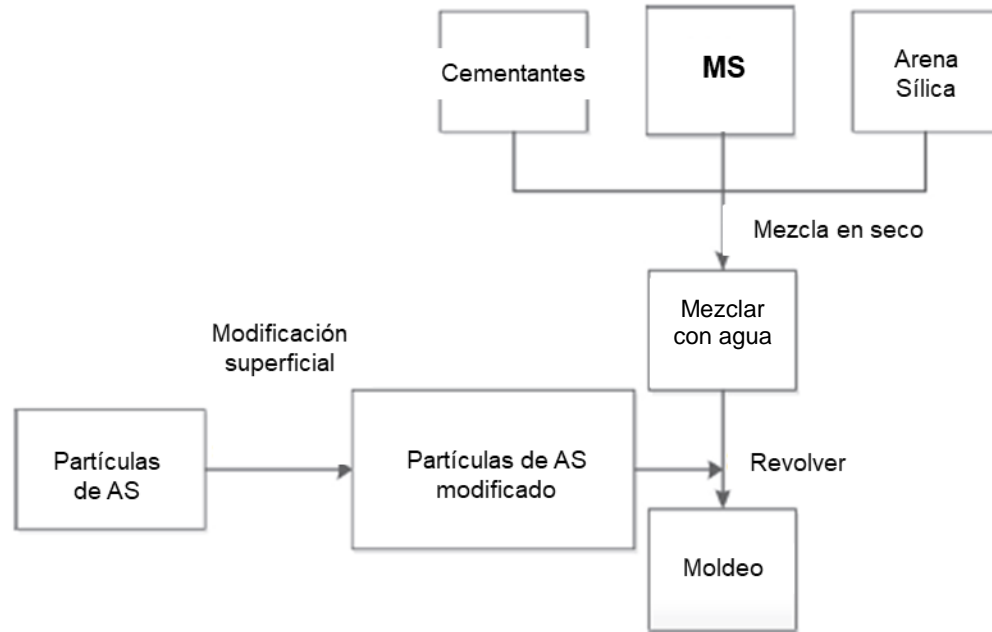


Figura 36. Proceso de preparación del mortero con AS [8].

De acuerdo con lo anterior, para este estudio se integró el mortero AN+EAH+MS con sus activantes K_2SO_4 , $Ca(OH)_2$ y cemento, además del agregado AS A1000 que contiene las partículas de mayor dimensión, con diámetro promedio de $424.40 \mu m$ que permitió observar adecuadamente si hubo degradación en el material, Figura 37.

El proceso de homogenizado se cumplió a los 180s y se percibió que tanto los cementantes y las partículas de AS se distribuyeron de manera adecuada, sin presentar concentraciones. Además, se advirtió que los cementantes se adhieren a las partículas del AS, envolviéndolas sin exponerlas a la degradación de tamaño. Esto se percibió como grumos que, al deshacerlos, se observaron las partículas envueltas por los polvos de los cementantes. Por tal motivo este tiempo

de homogenizado se establece como ideal y para ser utilizado en las futuras muestras con diferentes tamaños de AS, **Figura 38**.

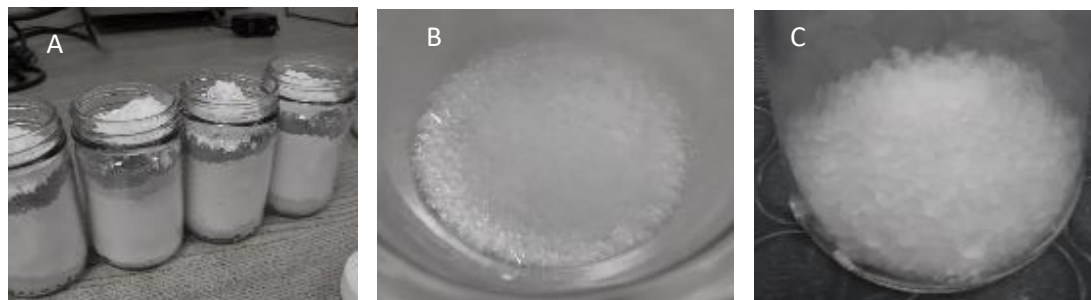


Figura 37. A) Cementantes proporcionados para la pasta, B y C) AS A1000.



Figura 38. A) Inclusión de partículas de As, B) Resultado de la homogenización, grumos envolventes del AS, C) Observación de partículas de AS envueltas en los cementantes durante el proceso de homogenización.

Se tuvo que realizar un estudio sobre la disolución de los aditivos modificadores superficiales, pues en cuanto al Silano (S) no tiene inconvenientes al diluirse en el agua, ya que su presentación es líquida; sin embargo, el copolímero (COP) por su consistencia viscosa parecida a la resina o silicón líquido, se determinó su procedimiento de disolución.

En forma manual se diluyó un poco de aditivo COP en agua destilada, mezclando con un agitador hasta conseguir su disolución. Al paso de unos minutos se le agregaron algunas partículas de AS para observar su reacción y compararla con una muestra elaborada sólo con agua destilada y AS.

Las observaciones fueron las siguientes: en la fórmula de Agua+AS se observó cómo las partículas quedan suspendidas y concentradas en la superficie del agua, advirtiendo que este comportamiento se produce por la condición hidrófuga del AS. Mientras tanto, en la fórmula de Agua+AS+COP, se percibe que las partículas se presentan suspendidas pero envueltas por el aditivo. Cambia la condición transparente a un aspecto de burbuja, por lo que se considera que es la capa de aditivo que actúa sobre las superficies de las partículas del AS, realizando el proceso de modificación para comenzar a cambiar la condición hidrófuga a hidrófila, **Figura 39**.

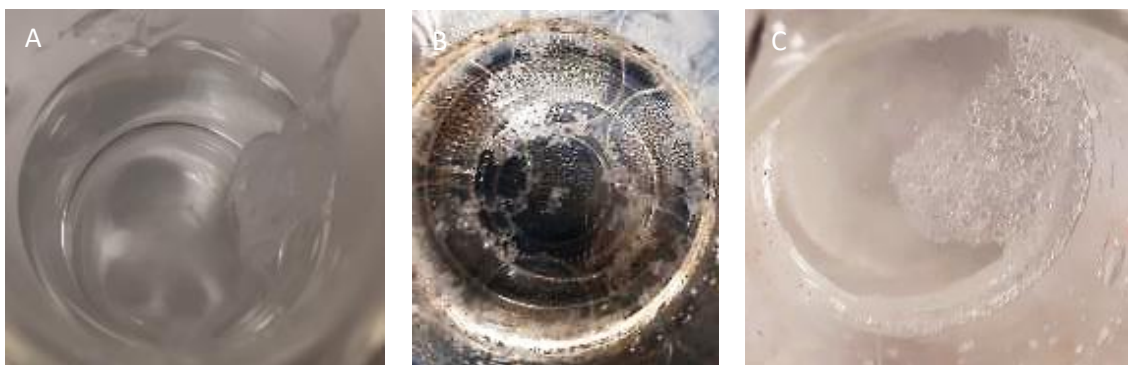


Figura 39. A) Aditivo COP, B) Partículas de AS suspendidas en agua destilada, C) Partículas de AS suspendidas en el agua, pero envueltas por el aditivo para su modificación superficial.

Se dejaron las fórmulas para su observación a las 24 h y se advierte que en la primera condición las partículas de AS no presentan ningún cambio, continúan suspendidas y concentradas en la superficie del agua, sin perder su condición hidrófuga; mientras tanto, en la segunda fórmula las partículas de AS envueltas por el aditivo ya no se presentan suspendidas en la superficie del agua, sino que se sedimentaron en la parte inferior del recipiente, a causa de la

modificación de su condición hidrófuga, convirtiéndola en hidrófila que les permitió absorber agua y por lo tanto, aumentar su peso y densidad, **Figura 40**.



Figura 40. A) AS suspendido sobre el agua por condición hidrófuga, B y C) AS modificado por el aditivo COP, partículas hidrolizadas y sedimentadas.

Con este estudio se determinó que la función del COP se cumplió, solo que se tiene que considerar su dosificación para el mortero, ya que se pretende que se modifique sólo la superficie y no toda la partícula del AS. Otra observación con respecto a esto es que se tomaron las partículas tratadas y se presionaron para ver si se obtenía polvo, como sucede regularmente con las partículas de AS y se menciona que la condición impermeable desapareció, pues no se originó polvo seco.

Se trabajó en determinar el procedimiento medible de la disolución del aditivo en el agua, por lo que se utilizó un agitador magnético y una fórmula compuesta de 67.66 g de agua destilada y 2.03 g del COP. Se observó que el aditivo fue disuelto a los 60 min con una intensidad de $\frac{3}{4}$ de potencia del equipo. Este procedimiento se siguió para las posteriores mezclas, **Figura 41**.

En cuanto al segundo aditivo que se menciona como S, por su presentación líquida, no requiere un proceso de disolución especial, pero se le

dio el mismo que al COP para realizar comparaciones adecuadas entre ambas sustancias.

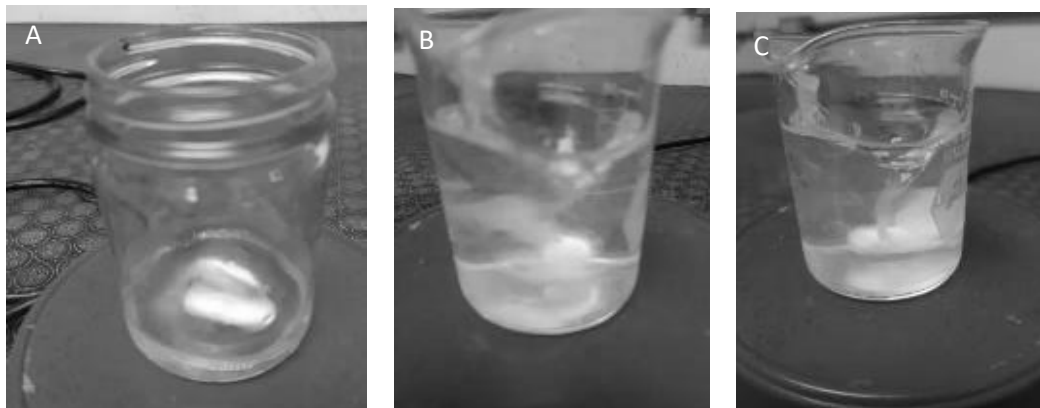


Figura 41. A) Agitador magnético para disolución del COP, B y C) Agitación para disolución de aditivo en agua destilada.

En la fórmula Agua+AS+S se percibe que el AS se queda suspendido en la superficie del agua. Esto se debe a la baja densidad de las partículas, que al removerlas y al paso del tiempo se observa que pasan de ser cristales sólidos duros a una consistencia como de gel, sin la dureza al presionarlos. Esto sugiere que el silano es un aditivo con mayor fuerza y modifica la estructura porosa del AS, cambiando su hidrofugosidad y permitiendo la absorción de un volumen mayor de agua más que en el caso del COP, **Figura 42.**

En cuanto a los comportamientos de los aditivos se puede percibir cómo en el caso de las soluciones con S y COP, las partículas de AS fueron envueltas por burbujas que las hacen verse más grandes y su volumen se amplía. En cuanto a las partículas con S, al paso del tiempo se modificaron volviéndose gelatinosas y las del COP, algunas de ellas se sedimentan en el fondo de la solución. Se define que el AS se modificó en mayor porcentaje a los 28 días,

absorbiendo una cantidad mayor de agua por el tiempo en que se expusieron a los aditivos que modificaron su condición hidrófuga, **Figura 43 y Tabla 10**.

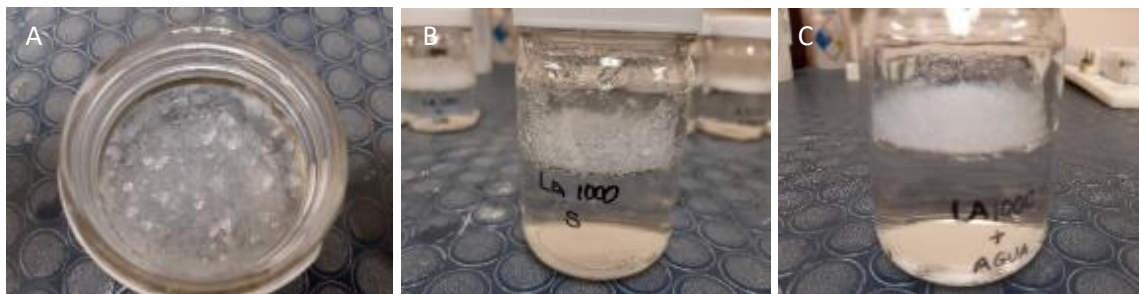


Figura 42. A) Partículas de AS sobre superficie de solución Agua+AS+S, B y C) Comparativa de partículas A1000 que permiten observar el cambio de textura de partículas, en el caso del S se vuelven más cristalinas por la absorción de agua en comparación a las partículas suspendidas en la solución de Agua+AS.

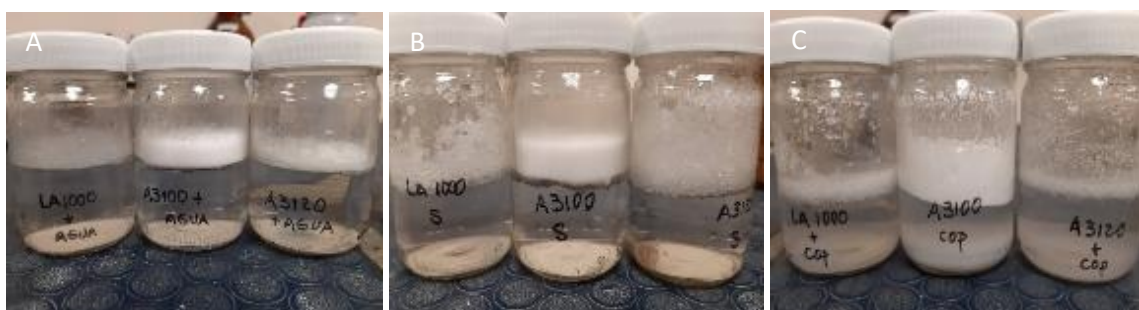


Figura 43. A) Partículas de AS en solución de agua, B) Partículas en solución con Silano y C) Partículas en solución copolímero.

Tabla 10. Efectos de modificación de superficie en partículas de AS.

Fórmula	Tiempo de observación	
	1 hr	24 hr
AS+Agua	AS permanece suspendido y concentrado en la superficie a pesar de agitaciones, por lo tanto conserva densidad baja y condición hidrófuga.	Sin modificación
	Al presionar las partículas se rompen y forman polvo	Sin modificación
AS+Agua+COP	AS permanece suspendido y concentrado en la superficie a pesar de agitaciones, por lo tanto conserva densidad baja y condición hidrófuga.	Las partículas se sedimentan en la parte inferior del recipiente, aumenta su peso y densidad.
	Partículas AS aparecen en la superficie envueltas por capsulas de aditivo	Cambio de condición hidrófuga a hidrófila, desaparece la condición impermeable, al presionar la partícula no se origina polvo.
AS+Agua+S	AS permanece suspendido y concentrado en la superficie a pesar de agitaciones, por lo tanto conserva densidad baja y condición hidrófuga.	Las partículas se modifican cambian de ser duras a tener una consistencia gelatinosa, se percibe que cambia su volumen como una expansión por el agua que absorbieron.
	Su aspecto se modifica las partículas son envueltas por burbujas pero de más cristalina.	Al presionar las partículas se obtenía agua de su interior, se modifica su condición hidrófuga a hidrófila.

3.2.3 Determinación de la finura EAH

Técnica de molienda para obtener el tamaño de grano y su análisis.

En el Molino pulidor de marca Swequipos, S.A. de C.V., Modelo DM-1, ½ Hp se tiene un peso de esferas metálicas de 56.90 kg, por lo tanto, para cada proceso de molido se agregó el 10% de material correspondiente a 5.690 kg que, a través de impactos y fricción entre las esferas y en la misma pared del vaso del molino, se obtuvo el tamaño requerido para la EAH, **Figura 44**.



Figura 44. Molino de esferas metálicas marca Swequipos.

Se realizó la limpieza del equipo a través de 3 kg de arena durante 20 minutos, para posteriormente retirarla y vaciar el recipiente del molino. Se continuó limpiando con una tela húmeda y se secó utilizando acetona. Este proceso también se llevó a cabo para limpiar las esferas y dejarlas libres de impurezas.

Se colocó el volumen de EAH y se estableció para el movimiento oscilatorio y vibratorio del equipo 40 oscilaciones por minuto. Se recolectaron 5.515 kg de material y 0.085 kg de residuos granulados, que permanecieron en la probeta de salida. El volumen restante se obtendrá al final de la molienda.

Se tomaron muestras a diferentes tiempos para establecer y evaluar el tamaño de partícula en el equipo Analizador de Distribución de tamaño de Partícula, Microtrac turbotrak S3500, obteniéndose en un tiempo de 20 minutos el porcentaje máximo del 20% de material retenido en la malla No. 325 que corresponde a un tamaño de 45 μm , cumpliendo lo establecido en la ASTM C989 [68].

El método de distribución de tamaño de partícula se emplea para medir la cuantía del tamaño esférico del grano de las partículas, desde 0.1 a 2000 μm , dependiendo del instrumento y por medio de la teoría de dispersión de luz, descrito anteriormente.

3.2.4 Ensayo de la fluidez y la trabajabilidad de la pasta AN-EAH-MS

Para obtener una pasta homogénea, de fácil manejo y moldeo, se elaboró una mezcla de consistencia media plástica, para obtener la trabajabilidad requerida para la fabricación de las muestras, con un intervalo de fluidez entre 110 +/- 5%, según la ASTM C109 [97].

Se utilizó la mesa de fluidez con los requerimientos de la ASTM 230 [178]. Primeramente, se espolvorean los cementantes y el AS en el agua, para su absorción e integración durante 30 segundos. En una mezcladora de mecanismo eléctrico de dos movimientos, rotatorio y giratorio y a una velocidad baja de 2.5 (140 +/- 5 r/min), se mezcla durante 30 segundos para luego integrar la arena sílica durante 30 segundos más a la misma velocidad en el caso del mortero. Se raspan las paredes del recipiente durante 15s para posteriormente cubrir el

recipiente con una tela húmeda y dejar reposar 1.15 minutos más. Por último, se mezcla la masa a una velocidad media de 4.5 (285 +/- 10 r/min) durante 1 minuto, procedimiento establecido en la ASTM C305 [179]. Se realizó el cálculo de la fluidez siguiendo el método establecido en la ASTM C1437 [78,180].

La relación cementantes (AN, EAH, MS, K₂SO₄, Ca(OH)₂ y Cemento) / agua, se determinó para este estudio en 0.50, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 y 0.85, todo en proporción al peso de los cementantes. Posteriormente se vierte la pasta en el molde cónico, rellenando en dos capas, para posteriormente apisonar para asegurar que no se formen huecos dentro de la muestra. Por último, se quita el exceso de mortero por medio de una espátula, con movimientos de sierra, para conseguir un buen acabado en la parte superior de las muestras.

Se levanta el molde después de 1 min para comenzar a dejar caer la mesa 25 veces en 15 segundos a una altura de 13 cm según ASTM 230 [181]; se midió el diámetro del mortero en las cuatro direcciones señaladas en la mesa de sacudidas, registrando cada dato al milímetro más cercano.

Se promedian los cuatro valores, obteniendo un diámetro promedio de la masa del mortero. Se resta el diámetro inicial y se divide entre el diámetro inicial para que, al multiplicarlo por 100, se obtenga el porcentaje de fluidez que, de acuerdo con la ASTM-1437 [180], se recomienda una consistencia media (plástica) para obtener una trabajabilidad adecuada para el manejo de la mezcla (ASTM 109) [182]. **Figura 45.**

$$\text{Fluidez} = (\text{DP} - \text{DI}) / \text{DI} \times 100$$

DP Diámetro promedio de las cuatro mediciones realizadas.

DI Diámetro inicial de la pasta o diámetro máximo del anillo (4"-10.16 cm).



Figura 45. Proceso de mezclado, vaciado, desmoldado y medición de diámetros de la pasta después de los golpes en la mesa de medición.

3.2.5 Calibración del Analizador de Propiedades Térmicas.

Para verificar la calibración del analizador de propiedades térmicas, equipo Tempos del grupo Meter; se consideró medir la conductividad y resistencia térmica a través de dos de los cuatro sensores, el TR-3 de 100 mm de longitud y 2.4 mm de diámetro, utilizado para suelos, materiales granulares y porosos, como se describe en la ASTM D5334 [183]; y el otro sensor RK-3 de longitud de 60 y 3.9 mm de diámetro diseñado para obtener la conductividad y resistencia térmica para materiales duros como rocas o concreto curado.

Se adquirió como primer material a medir una pieza de placa termoaislante de la marca Hebel de 62.5 cm de largo, 20 de alto y 5 cm de espesor, con una densidad de 400 kg/m³, así como un peso de 3.0 kg y conductividad térmica estática de 0.0977 W/mK según especificaciones del proveedor, elemento que fue recortado para obtener una pieza de 20 X 20 X 5 cm. Como el segundo material a evaluar se utilizó una pasta de yeso de la marca Máximo, que de

acuerdo con *Ghazi Wakili*, la conductividad térmica del yeso hidratado secado a temperatura ambiente es de 0.3 W/mK [184].

Se realizaron tres mediciones de conductividad térmica para cada una de las muestras y para cada tipo de sensor. Los datos obtenidos de la placa termoaislante (HEBEL) presentan un intervalo de precisión del 3.07 a 12.79% con el sensor RK-3; mientras que se obtuvieron porcentajes de 16.17 a 17.60% con el sensor TR-3.

Con respecto a la pasta de yeso, se obtuvo una precisión del 0.43 a 2.07% con el RK-3 y 7.47 a 15.20% con el TR-3. Por tal motivo, se demuestra que los valores con el sensor RK-3 presentan porcentajes de precisión más cercanos a los valores estandarizados de los materiales empleados en este estudio y dentro del intervalo de precisión establecido de un 10 a 15% (ASTM D5334) y con mediciones que se encuentran dentro del 0.43% en el caso del yeso y 3.07% en la placa de Hebel, **Tabla 11**.

Tabla 11. Conductividad térmica placa termoaislante Hebel y pasta de yeso, con sensores TR-3 y RK3.

Sensor	Placa termoaislante Hebel 0.0977 W/m.K		Pasta de Yeso 0.30 W/m.K	
	Conductividad Térmica W/m.K	Precisión de Medición 15%	Conductividad Térmica W/m.K	Precisión de Medición 15%
TR-3	0.0805	17.60%	0.3224	7.47%
	0.0814	16.68%	0.3314	10.47%
	0.0819	16.17%	0.3456	15.20%
RK-3	0.0852	12.79%	0.3062	2.07%
	0.0947	3.07%	0.2987	0.43%
	0.0937	4.09%	0.305	1.67%

Se precisa que para este estudio se sometió la muestra de yeso a un secado de 40°C en un día [185], ya que se percibía que la muestra continuaba presentando señales de humedad y esto ocasionaría que la medición térmica no fuera fiable, **Figura 46.**

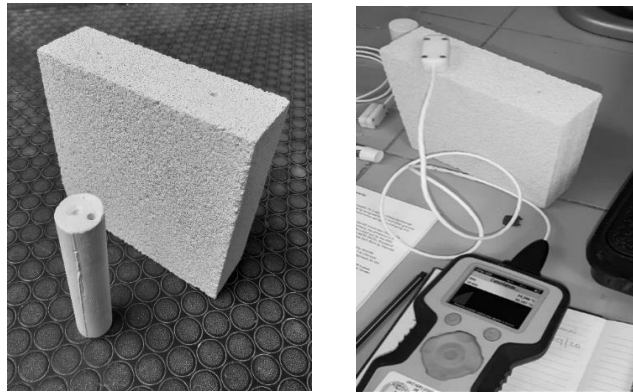


Figura 46. A) Muestras de Hebel y yeso comercial perforados para medición de la conductividad térmica, B) Medición térmica con el equipo Tempos Meter.

3.2.6 Elaboración de muestras.

Las muestras fueron preparadas siguiendo el procedimiento de mezclado descrito en la norma ASTM 305 (Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency), donde se señala que al contenido de agua ya con los aditivos incluidos según proceso de disolución determinado anteriormente, se agregan los cementantes. En este estudio, previamente homogenizados con el AS, se espolvorean en un tiempo de 30 segundos para la absorción del agua. Posteriormente, de forma manual, se procede a mezclar según recomendación por Saenz-Pont [26] cuidando no afectar el tamaño de partícula de AS durante 60 segundos.

Se utilizan moldes cúbicos de 1X1" para pruebas de hidratación y durabilidad del concreto, que fueron previamente preparados con desmoldante y se siguen las indicaciones para el proceso de moldeo descritas en la ASTM C109.

Se coloca una capa de pasta hasta la mitad del molde y se apisona la mezcla por medio de una barra de neopreno, dando 32 golpes en un período de 10 segundos en cuatro rondas de 8 golpes. Posteriormente se llena por completo el recipiente, apisonando otra capa nuevamente con la misma cantidad de golpes, para luego remover el material excedente por medio de una espátula que logre un acabado plano en la superficie de la muestra.

Las muestras ya moldeadas se protegen con plástico para emplayar y evitar la pérdida de humedad. Al siguiente día se desmoldan las muestras y se colocan en un recipiente con una solución de agua y cal en proporción de 1 litro de agua por 3 gramos de cal, siguiendo el proceso de curado como lo indica la ASTM C31. A la edad en que la muestra se tiene que ensayar, se retira del recipiente secando la humedad excesiva y se procede a su análisis, **Figura 47**.



Figura 47. A) Molde para muestras de 1" X 1", B) Muestras obtenidas con diferentes condiciones tamaños de partículas y aditivos, C) Proceso de curado de muestras.

Etapa III

3.3 Estudio de la selección de tamaño de partícula AS y aditivo modificador.

En esta etapa se definió el tamaño de partícula de AS que otorga mejores propiedades mecánicas y térmicas, además de cuál de los dos aditivos modificadores presta mayor beneficio a la compatibilidad del AS en el MC.

3.3.1 Preparación de las pastas.

Se elaboraron mezclas con cantidades constantes de cementantes, para tener muestras comparables, obteniéndose tres grupos o familias (AS, AS+S y AS+COP), donde la principal diferencia es el uso de los diferentes tamaños de partículas del AS y el aditivo utilizado para su modificación superficial con el fin de determinar cuál es el que presenta mejores beneficios al MC.

Con este estudio se evaluó cuál de los dos aditivos S (AS+S) y COP (AS+COP) presentan los mejores comportamientos generando una mayor estabilidad en las pastas al agregarle el AS. Se obtuvo una muestra de referencia con las proporciones utilizadas en la composición determinada por *Guerra Cossío* [27], donde el MC ternario se integra por AN-EAH-MS en un 70 - 25.5 – 4.5% respectivamente. La mezcla contiene la adición constante de los constituyentes activadores, en el caso de la AN el 3% de Sulfato de Potasio (K_2SO_4) y el 4% de Hidróxido de Calcio ($Ca(OH)_2$) y para reactivar la EAH un 7% de cemento, **Tabla 12.**

En el estudio de fluidez se determinó emplear una mezcla de consistencia media plástica, por lo que, tomando el peso de los cementantes y activantes, se

proporciona la relación de un 65% de agua en peso. En lo que respecta a la inclusión de los aditivos, se emplea una concentración del 3% del contenido de agua para la elaboración de las mezclas con S y COP, **Tabla 12**.


Tabla 12. Proporciones para elaboración de pastas (g).

Codigo de Muestra	C1	C2	C3	Activante C1	Activante C1	Activante C2	vol-dens		Aditivo 1	Aditivo 2	
	AH	EAH	MS	K ₂ SO ₄	Ca(OH) ₂	Cemento	Aerogel	Agua	Silano	Copolimero	
	70%	25.50%	4.50%	3%	4%	7%	25%	65% cem+act	3% Agua	3% Agua	
MC	MR	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	-	74.30	-	-
AS	A1000	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	-
	A3120	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	-
	A3110	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	-
	A3100	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	-
AS+S	A1000S	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	2.23	-
	A3120S	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	2.23	-
	A3110S	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	2.23	-
	A3100S	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	2.23	-
AS+COP	A1000C	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	2.23
	A3120C	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	2.23
	A3110C	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	-	2.23
	A3100C	75.00	27.32	4.82	2.25	3.00	1.91	1.73	74.30	0.00	2.23

En lo referente al AS, se consideran las recomendaciones de los autores que refieren que para la densidad tan baja del aerogel, es recomendable proporcionarlo de acuerdo con el volumen de los materiales aglutinantes. De esa forma y multiplicado por la densidad promedio de las partículas, se obtiene el peso que corresponde a su proporción dentro del compuesto [7].

Se estima el volumen y las dosificaciones de materiales para la elaboración de las muestras necesarias para los ensayos de propiedades mecánicas y de conducción térmica correspondientes a esta etapa, **Tabla 13, 14, 15, 16 y 17.**

Tabla 13. Estimación de volumen de pasta necesaria para el estudio de determinación del tamaño de partícula AS y Aditivos (g).

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL POSGRADO DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN		
	Elaboración de:	PASTAS	
Datos de Diseño de la Mezcla	AN+EAH+MS+AS 25% (ETAPA 3)		
Nombre de la Mezcla	PASTAS DE AN+EAH+MS+AS 25%; CON ACTIVANTES C1 K ₂ SO ₄ (3%) Y Ca(OH) ₂ (4%), ACTIVANTE C2 CEMENTO (7%), AGUA 65% CEM+ACT Y ADITIVOS TENSOACTIVOS SILANO Y COPOLÍMERO (3% AGUA).		
Elaboró:	Mtro. Arq. Ricardo Valdez Cano		

DATOS DE LA PRUEBA								
Prueba :	Ensayo de compresión y conductividad térmica				FECHA:	28 de Enero 2020		
	para determinar tamaño de partícula y aditivo					Edad de prueba		
Edades de Ensayo:	2	7	28					
Muestras por Edad	3	3	6					
No. De Especímenes	6+1							
	Cilindrico	1	Volumen	2.54	7.20	2.54	46.45	CMS³
	Cúbico	6	Volumen	2.54	2.54	2.54	16.39	CMS³
Total de Volumen Requerido							62.83858	CMS³
			Volumen Total	COMPRESION			98.32	
			Volumen Total	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA			46.45	
			Volumen Total	pruebas			144.77	
			Porcentaje de Sobrante	%			10	14.48
			Volumen Requerido				CMS³	159.25

Tabla 14. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A3100.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES PASTA AS 25% (A3100)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	92.00	2.83	32.51
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	33.51	2.80	11.97
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	5.91	2.28	2.59
					131.43		47.07
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	2.76	2.66	1.04
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	3.68	2.21	1.66
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	2.35	1.91	1.23
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	0.00	2.65	0.00
AGREGADO	E	AS A3100	AS/C	25%	1.41	0.12	11.77
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	91.14	1.00	91.14
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	2.73	1.018	2.69
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	2.73	0.946	2.89
VOLUMEN FINAL							159.49

Tabla 15. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A3110.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES PASTA AS 25% (A3110)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	92.00	2.83	32.51
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	33.51	2.80	11.97
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	5.91	2.28	2.59
					131.43		47.07
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	2.76	2.66	1.04
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	3.68	2.21	1.66
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	2.35	1.91	1.23
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	0.00	2.65	0.00
AGREGADO	E	AS A3110	AS/C	25%	1.65	0.14	11.77
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	91.14	1.00	91.14
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	2.73	1.018	2.69
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	2.73	0.946	2.89
VOLUMEN FINAL							159.49

Tabla 16. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A3120.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES PASTA AS 25% (A3120)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	92.00	2.83	32.51
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	33.51	2.80	11.97
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	5.91	2.28	2.59
					131.43		47.07
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	2.76	2.66	1.04
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	3.68	2.21	1.66
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	2.35	1.91	1.23
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	0.00	2.65	0.00
AGREGADO	E	AS A3120	AS/C	25%	1.77	0.15	11.77
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	91.14	1.00	91.14
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	2.73	1.018	2.69
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	2.73	0.946	2.89
VOLUMEN FINAL							159.49

Tabla 17. Dosificaciones de pastas AN+EAH+MS+AS (25%) con tamaños de partículas A1000.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES PASTA AS 25% (A1000)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	92.00	2.83	32.51
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	33.51	2.80	11.97
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	5.91	2.28	2.59
					131.43		47.07
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	2.76	2.66	1.04
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	3.68	2.21	1.66
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	2.35	1.91	1.23
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	0.00	2.65	0.00
AGREGADO	E	AS A1000	AS/C	25%	2.12	0.18	11.77
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	91.14	1.00	91.14
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	2.73	1.018	2.69
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	2.73	0.946	2.89
VOLUMEN FINAL							159.49

3.3.2 Resistencia mecánica a la compresión.

Para evaluar los efectos por la adición de AS, del tamaño de sus partículas y el efecto de la inclusión de los aditivos modificadores, se realizaron las pruebas de compresión de cada uno de los estudios, de acuerdo con ASTM C109, que recomienda realizar el ensayo con una aplicación entre 200-400 lb, por lo que se tomaron 100 kg en el equipo Instron 600DX.

La resistencia se calculó mediante la carga de compresión máxima experimentada por la muestra, por el área de sección transversal inicial [3], probándose 3 muestras para cada una de las condiciones y se consideró la desviación estándar que es representada con una barra vertical en la gráfica correspondiente a cada estudio.

Se obtuvo una muestra representativa del MC para comparar sus propiedades con las que contienen AS y los aditivos modificadores S, que es un agente de acoplamiento para la modificación superficial y enlace de materiales [141] y el COP que forma una membrana interna que evita que la humedad de los concretos y morteros frescos se evapore con rapidez [145].

Se consiguieron tres grupos de muestras, y en cada uno se experimentaron las cuatro variantes de tamaños de partículas del AS, el A3100 de 0.002 - 0.04mm, A3110 con 0.1 - 0.7mm, A3120 de 0.1 - 1.2mm y A1000 con 1.4mm; en el Grupo MC-AS al MC se le adicionó el 25% de AS con respecto al volumen de los cementantes.

Se tomó la nomenclatura MC-25A1000, donde 25A es el porcentaje de agregado AS y 1000 es el tamaño de partícula utilizado.

En los grupos MC+AS+S y MC+AS+COP, al MC con agregado de AS, se le adicionó el 3% de cada aditivo con respecto al peso del agua de la mezcla. En este estudio se evaluaron muestras en pasta, donde la relación agua/cementantes se fijó en 0.65% de acuerdo con el estudio de fluidez y trabajabilidad obtenida anteriormente; se elaboraron cubos de 1" para moldear la pasta según el proceso recomendado en la ASTM C305 [186,179].

Las muestras al desmoldarlas se protegen con plástico para emplear y evitar la pérdida de humedad, conservándolas en esta condición durante un día, para posteriormente pasarlas a un proceso de curado, donde en un recipiente se colocan las muestras con una solución compuesta por agua y cal en una relación de 3 g de cal por cada litro de agua, como se indica en ASTM C31 [187] [188]. Al cumplir la edad de ensayo, se retiran las muestras y se seca la humedad excesiva, para proceder a su análisis de propiedades mecánicas de resistencia a la compresión a las edades de 7 y 28 días, evaluando 3 muestras para cada condición, **Tabla 18** y **Figura 48**.

Tabla 18. Composición de muestras para estudio del tamaño de partícula de AS y aditivo modificador.

Grupo	Id. Muestra	MC %VT	AS %VT	A %VT	S %VT	COP %VT
Multi-compound	MC	61	-	39	-	-
MC+AS	MC-25A1000	33	8	59	-	-
	MC-25A3120	33	8	59	-	-
	MC-25A3110	33	8	59	-	-
	MC-25A3100	33	8	59	-	-
MC+AS+S	MC-25A1000-3S	33	7	58	2	-
	MC-25A3120-3S	33	7	58	2	-
	MC-25A3110-3S	33	7	58	2	-
	MC-25A3100-3S	33	7	58	2	-
MC+AS+COP	MC-25A1000-3COP	33	7	58	-	2
	MC-25A3120-3COP	33	7	58	-	2
	MC-25A3110-3COP	33	7	58	-	2
	MC-25A3100-3COP	33	7	58	-	2

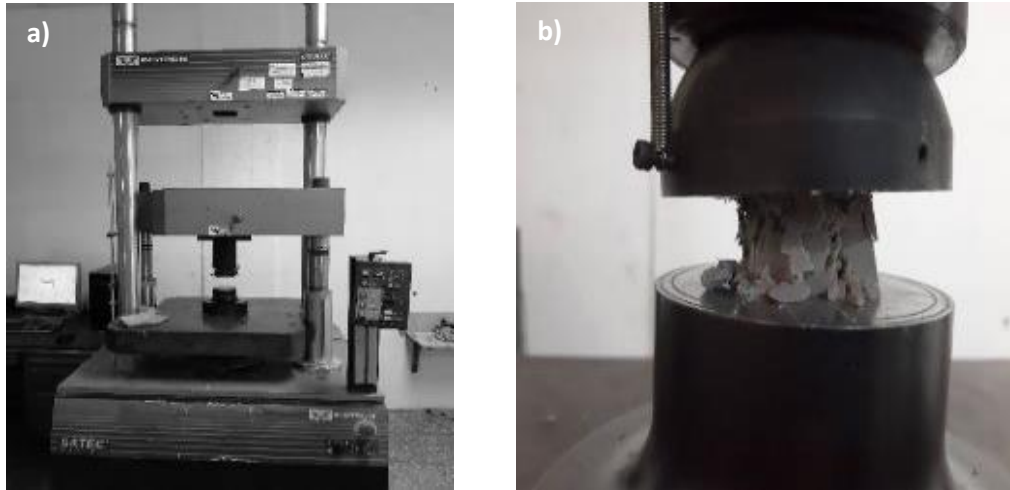


Figura 48. a) Máquina Universal Instron 600Dx, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, b) Ensayo de resistencia a la compresión muestra con AS.

3.3.3 Conductividad y resistencia térmica.

Se determinaron las propiedades de conductividad y resistencia térmica de las pastas y los morteros, de acuerdo con el método de la sonda de aguja térmica para materiales homogéneos y el flujo de calor, Heat Flow Meter (HFM).

Se realizaron las muestras de forma cilíndrica, con medidas de 7.2 cm de longitud según ASTM D5334 [183] y diámetro de 2.5 cm [189]. Las muestras se elaboraron siguiendo el procedimiento descrito en la ASTM C109, así como su desmolde y curado para experimentarse a los 28 días de edad [190]. Después se llevaron a un proceso de secado, por medio de un horno Matest a los 40°C a un día [191-192], para continuarse secando durante otro día más, hasta obtener masa constante que, en este caso, se llevó siete días de secado.

Se perforaron las muestras por medio de una broca para concreto de 5/32” (4 mm) de diámetro. Se empleó grasa térmica de conductividad 4 W/mK para disipar el calor entre la aguja y la muestra (ASTM D5334).

Se limpió el orificio con aire comprimido para incrustarse la sonda que contiene un elemento que calienta (calefactor) que genera calor por medio de una corriente de voltaje aplicada a la sonda que aumenta la temperatura en el “proceso de calentamiento” que tiene una duración de 5 minutos, donde el comportamiento del material es monitoreado a través de un termopar o termistor.

Cuando la temperatura baja, se detiene el calentamiento e inicia el “proceso de enfriamiento” que es durante esta etapa donde se registran los efectos y variaciones de temperatura durante un período de 5 minutos más. El total de la lectura es de 10 minutos y se tomaron tres lecturas para cada una de las muestras y para así obtener un promedio del resultado.

El principio de la técnica es el aumento de la temperatura por medio de una fuente de calor interna, que en un sólido se realiza incrustando una fuente de calor lineal en el material, por lo que se monitorea la respuesta de las muestras para analizar el comportamiento, los efectos, las variaciones de temperatura y determinar sus propiedades térmicas [189], **Figura 49 y Figura 50.**

El equipo es configurado para ser utilizado con el sensor RK-3 para la medición de la conductividad y la resistencia térmica, el cual se determina como el más conveniente según el proceso de calibración descrito anteriormente. El poder utilizado para las mediciones en este sensor es el Alto (recomendación del proveedor del equipo), el tiempo de lectura es de 10 min, dejando así el proceso de calentamiento con 5 min y el ciclo de enfriamiento otros 5 min. En la medición se tomaron las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional (SI) para la conductividad W/mK y para la resistencia térmica °C.m/W [95].

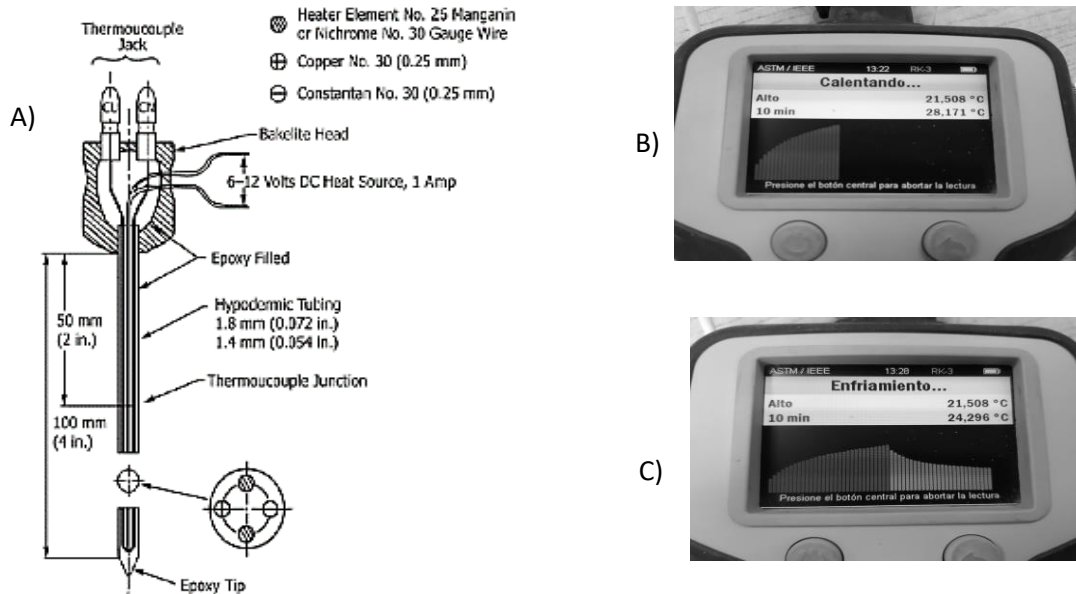


Figura 49. A) Componentes de la aguja o sonda térmica [95], B) Analizador de propiedades térmicas Tempos proceso de calentamiento, C) Ciclo de enfriamiento.

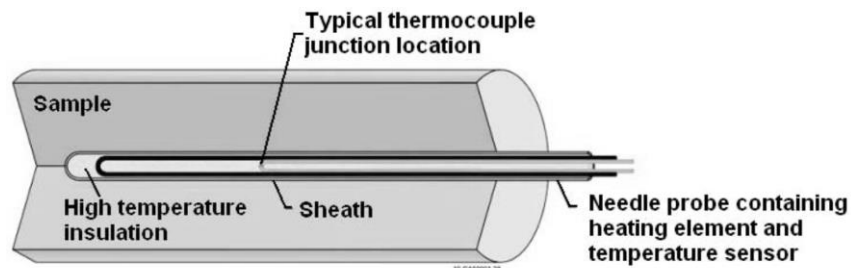


Figura 50. Diagrama esquemático de la sonda de aguja para medir la conductividad térmica [96].

Se consideraron los resultados del estudio de calibración del aparato con las mediciones obtenidas de la muestra de yeso para que, de acuerdo con la ASTM D5334, calcular el coeficiente de calibración.

$$C = \frac{\lambda \text{ del material}}{\lambda \text{ de la medición}} = \frac{0.30}{0.3033} \quad C = 0.011 \quad [95]$$

Este valor de 0.011 se compara con el promedio del error estándar calculado por el equipo que oscila entre 0.0064 (MR) hasta 0.00589 (A1000COP) y se encuentra dentro de este intervalo.

Etapas IV

3.4 Estudio de proporción del AS y dosificación aditivo COP.

Se desarrolla un estudio que tiene como objetivo analizar la proporción de AS además de la dosificación ideal del aditivo modificador que muestren las mejores propiedades del MC.

3.4.1 Proporción del AS.

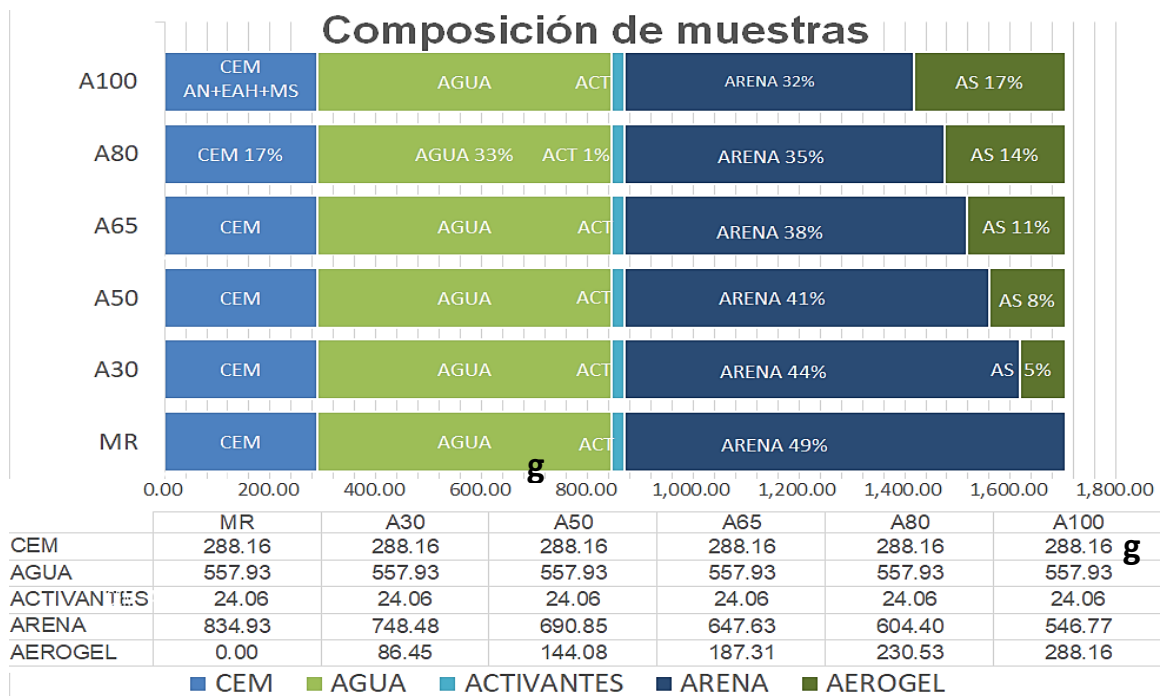
Para este estudio se trabajó con mortero en proporciones recomendadas para aprovechar la conductividad térmica de AS y evaluar su comportamiento mecánico. Se realizaron mezclas agregando el 30% de AS [2], 50, 65, 80 [86] y 100% [2], todo con respecto al volumen de los cementantes utilizados. Se tomaron porcentajes constantes del 17% del volumen de los cementantes, el 33% de agua, el 1% de activadores de cementantes y el 49% del volumen de arena Sílica calculada en base a la proporción de 2.75 de la masa de los cementantes como recomienda ASTM C109.

En las composiciones de las muestras se sustituye el contenido del agregado fino de arena, por el volumen de AS tomado con base en el volumen de los cementantes [94], **Tabla 19 y Gráfica 01**. Para este estudio se formaron muestras cúbicas de 2" y se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión

a las edades de 3 [193], 7, 14 y 28 días [194], por lo que se realizaron los cálculos de volumen de cada uno de los materiales, **Tablas 20, 21, 22, 23, 24 y 25**.

Tabla 19. Composición de muestras estudio de proporción de AS.

Id. Muestra	Cem %VT	Act %VT	A %VT	Ar %VT	SA %VT
MC (CEM+ACT+W+SS)	17	1	33	49	-
MC-30A	17	1	33	44	5
MC-50A	17	1	33	41	8
MC-65A	17	1	33	38	11
MC-80A	17	1	33	35	14
MC-100A	17	1	33	32	17



Gráfica 01. Proporción de materiales empleados en los diferentes morteros a evaluar.

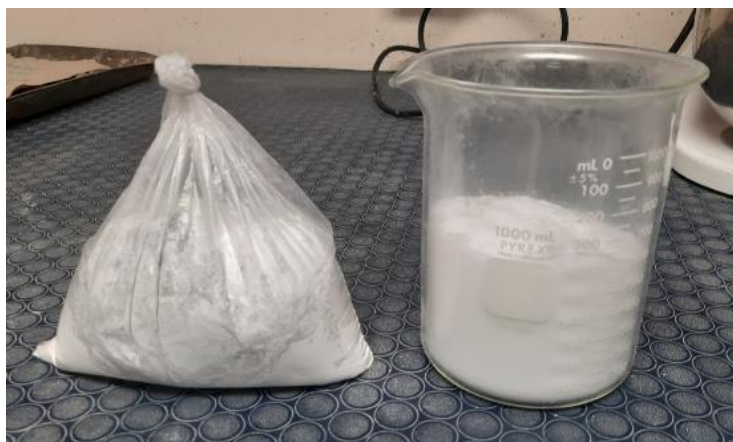




Figura 51. Dosificación de partículas de AS A3100 considerando el 100% del volumen de los materiales aglutinantes.

Tabla 20. Estimación de volumen de mortero necesario para estudio de la dosificación del AS (g).

	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL POSGRADO DOCTORADO EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
	MORTERO	
Elaboración de:	AN+EAH+MS+AS 30% ,50%,65%,80% y 100% (ETAPA 4)	
Datos de Diseño de la Mezcla	MORTERO AN+EAH+MS+ AS ; CON ACTIVANTES C1 K ₂ SO ₄ (3%) Y Ca(OH) ₂ (4%), ACTIVANTE C2 CEMENTO (7%),	
Nombre de la Mezcla	AGUA 65% CEM; VARIACIÓN PROPORCIÓN AEROGEL 30%, 50%, 65%, 80% y 100%	
Elaboró:	Mtro. Arq. Ricardo Valdez Cano	

DATOS DE LA PRUEBA							
Prueba :	Compresión y Conductividad térmica				FECHA:	25-ene-21	
	para determinar proporción AS.					Edad de Pruebas	
Edades de Ensayo:	4		1	7	14	28	
Muestras por Edad	3		3	6	9	12	
No. De Especímenes	12						
Molde:	Cúbico	12					
	Cilíndrico	1					
			Flexión				
			5	5	5	125	CMS³
			2.5	2.5	8	50.00	CMS³
			Total de Volumen Requerido			175	CMS³
			Volumen Total (COMPRESIÓN)				1,500.00
			Volumen Total (CONDUCTIVIDAD TÉRMICA)				50.00
			Volumen Total COMPRESIÓN Y CONDUCTIVIDAD				1,550.00
			Porcentaje de Sobrante		%	10	155.00
			Volumen Requerido			CMS³	1,705.00

Tabla 21. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS30 partículas A3100.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES (AN+EAH+MS+AS30)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	563.20	2.83	199.01
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	205.17	2.80	73.27
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	36.21	2.28	15.88
					804.57		288.16
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	16.90	2.66	6.35
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	22.53	2.21	10.19
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	14.36	1.91	7.52
AGREGADO	D	ARENA+AS	Ar/C	2.75	2,212.57	2.65	748.48
AGREGADO	E	AS	AS/C	30%	10.37	0.12	86.45
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	557.93	1.00	557.93
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	0.00	1.018	0.00
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	0.00	0.946	0.00
VOLUMEN FINAL							1,705.09

Tabla 22. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS50 partículas A3100.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES (AN+EAH+MS+AS50)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	563.20	2.83	199.01
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	205.17	2.80	73.27
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	36.21	2.28	15.88
					804.57		288.16
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	16.90	2.66	6.35
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	22.53	2.21	10.19
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	14.36	1.91	7.52
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	2,212.57	2.65	690.85
AGREGADO	E	AEROGEL DE SÍLICE (AS)	AS/C	50%	17.29	0.12	144.08
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	557.93	1.00	557.93
	A/AS	AS	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	0.00	1.018	0.00
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	0.00	0.946	0.00
VOLUMEN FINAL							1,705.09

Tabla 23. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS65 partículas A3100.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES (AN+EAH+MS+AS65)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	563.20	2.83	199.01
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	205.17	2.80	73.27
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	36.21	2.28	15.88
					804.57		288.16
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	16.90	2.66	6.35
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	22.53	2.21	10.19
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	14.36	1.91	7.52
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	2,212.57	2.65	647.63
AGREGADO	E	AEROGEL DE SÍLICE (AS)	AS/C	65%	22.48	0.12	187.31
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	557.93	1.00	557.93
	A/AS	AS	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	0.00	1.018	0.00
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	0.00	0.946	0.00
VOLUMEN FINAL							1,705.09

Tabla 24. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS80 partículas A3100.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES (AN+EAH+MS+AS80)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	563.20	2.83	199.01
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	205.17	2.80	73.27
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	36.21	2.28	15.88
					804.57		288.16
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	16.90	2.66	6.35
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	22.53	2.21	10.19
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	14.36	1.91	7.52
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	2,212.57	2.65	604.40
AGREGADO	E	AS	AS/C	80%	27.66	0.12	230.53
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	557.93	1.00	557.93
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS							
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	0.00	1.018	0.00
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	0.00	0.946	0.00
VOLUMEN FINAL							1,705.09

Tabla 25. Dosificaciones de mortero AN+EAH+MS+AS100 partículas A3100.

PARÁMETROS Y VOLUMENES DE MATERIALES (AN+EAH+MS+AS100)							
CEMENTANTES			Condición	Porcentaje	Peso g	Densidad g/cm ³	Volumen cm ³
	C-1	ANHIDRITA (AN)	70/100	70	563.20	2.83	199.01
	C-2	ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH)	25.5/100	25.5	205.17	2.80	73.27
	C-3	MICRO-SÍLICE (MS)	4.5/100	4.5	36.21	2.28	15.88
					804.57		288.16
AGREGADOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGREGADO	A	3% K ₂ SO ₄	3% C-1	3%	16.90	2.66	6.35
AGREGADO	B	4%Ca(OH) ₂	4% C-1	4%	22.53	2.21	10.19
AGREGADO	C	25.5+7% Clinker	7% C-2	7%	14.36	1.91	7.52
AGREGADO	D	ARENA	Ar/C	2.75	2,212.57	2.65	546.77
AGREGADO	E	AS	AS/C	100%	34.58	0.12	288.16
AGUA			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
AGUA	A/C	AGUA CEMENTANTES	W/C	0.65	557.93	1.00	557.93
	A/AS	AGUA DE AEROGEL	%W/C	0.1	0.00	1.00	0.00
ADITIVOS			Condición	Porcentaje	g	g/cm ³	cm ³
ADITIVO	I	SURFACTANTE TENSO-ACTIVO	P/CP	1	0.00	1.000	0.00
	II	COPOLÍMERO	P/CP	3%	0.00	1.018	0.00
	III	SILANO KH550	P/CP	3%	0.00	0.946	0.00
VOLUMEN FINAL							1,705.09

3.4.2 Dosificación del aditivo modificador del AS.

Se planteó evaluar la inclusión del aditivo modificador para la superficie del AS, por lo que se realizaron muestras considerando el 1, el 3 y el 5% de aditivo [145] [25] con respecto al peso del agua utilizada para la mezcla. Se realizaron cubos de 2" para la evaluación de las propiedades mecánicas a la compresión, considerando las edades de 3 [193], 14, 28 [194], 56, 90 y 180 d [195]. Para este estudio las nomenclaturas se definieron como MC-65A-1, representando al multi -compuesto, el porcentaje de AS y la dosificación del aditivo, respectivamente, **Tabla 26.**

Tabla 26. Composición de muestras estudio de dosificación del aditivo modificador.

Id. Muestra	Cem %VT	Act %VT	A %VT	Ar %VT	SA %VT	COP %VT
MC-50A-1	16.80	1.40	32.60	40.40	8.40	0.40
MC-50A-3	16.70	1.40	32.40	40.10	8.40	1.00
MC-50A-5	16.60	1.40	32.20	39.80	8.30	1.70
MC-65A-1	16.80	1.40	32.60	40.40	8.40	0.40
MC-65A-3	16.70	1.40	32.40	40.10	8.40	1.00
MC-65A-5	16.60	1.40	32.20	39.80	8.30	1.70
MC-80A-1	16.80	1.40	32.60	40.40	8.40	0.40
MC-80A-3	16.70	1.40	32.40	40.10	8.40	1.00
MC-80A-5	16.60	1.40	32.20	39.80	8.30	1.70

Etapa V

3.5 Modelación y simulación energética.

Se desarrolló la simulación a través del software Designó Builder Versión 7.0, interfaz gráfica del Energy Plus [196]. Se modeló un prototipo de vivienda proporcionado por la empresa Metro casas Residenciales S.A. de C.V., que se construye en Torreón, Coahuila [197]; ciudad que es representativa de una zona climática desértica con condiciones extremas de temperaturas.

Se tiene una superficie de 212.10 m² de construcción en dos niveles. Está integrada por tres recámaras, 3 1/2 baños, cocina, comedor, sala y estancia de televisión, similar a la evaluada por *Sanz, 2016* [14] y *Chaham [100]*, además de ser un prototipo que comúnmente se está construyendo en esta ciudad y con gran aceptación en el crecimiento del sector residencial, **Figura 52 y 53**.

Se realizó una comparación del sistema constructivo determinado por la empresa contra la mejora de las fachadas, por la incorporación del aislamiento térmico estudiado en esta investigación.

Se toman las propiedades térmicas de resistencia y conductividad calculadas para diseñar las características del sistema constructivo a evaluar [106,198], considerando que la resistencia térmica total (Valor R) de todo el elemento envolvente de muros debe ser de 1.00, 1.23 y 1.80 m²K/W, señaladas para condiciones mínimas de habitabilidad y para ahorro de energías respectivamente. Esto de acuerdo con la zona térmica 3C o zona climática Cs de la clasificación de Köppen, [93,100].

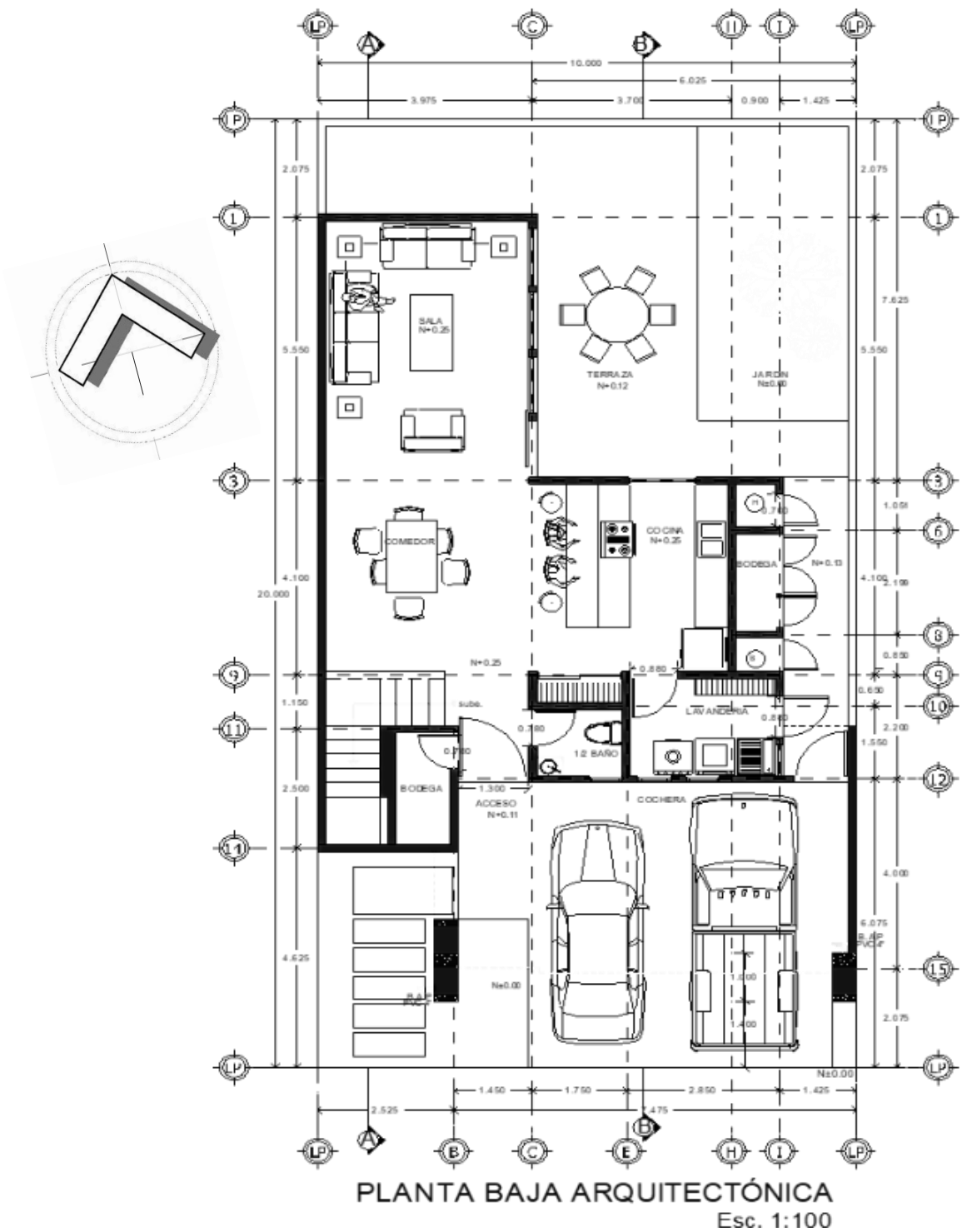


Figura 52. Planta arquitectónica vivienda unifamiliar prototipo Santa Bárbara (Planta Baja).



Figura 53. Plantas arquitectónicas vivienda unifamiliar prototipo Santa Bárbara (Planta alta).

Para la evaluación se propuso aplicar el mortero en: 1) Recubrimiento exterior (REXT), 2) Recubrimiento exterior e interior (REXT-INT), 3) Elemento de mampostería (RTAB) [100] y 4) Muro impresión (3D) [101], **Figura 54.**

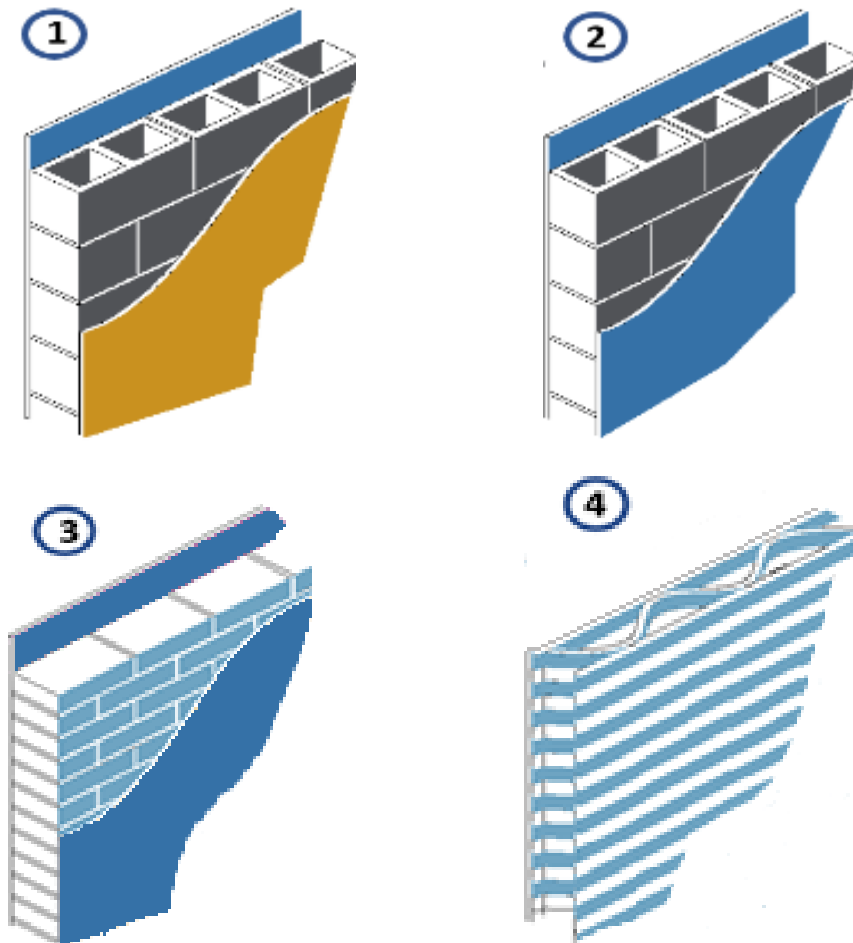


Figura 54. 1) MC en recubrimiento exterior 2cm (REXT)+block de concreto 15cm y recubrimiento interior de yeso 1.5cms; 2) MC en recubrimiento Exterior e Interior 2cm (REXT-INT) y block de concreto 15 cm; 3) MC en recubrimiento exterior e interior y tabique 14cm (RTAB); 4) MC en Impresión (3D) líneas de recubrimiento exterior e interior y línea de refuerzo interior c/u 2cm y 11 cm de vacío.

Se tomó el método simplificado de la norma NMX-C-460- ONNCCE-2009, donde se describen los parámetros para realizar la evaluación de las propiedades térmicas de los muros. Este cálculo ayuda a obtener una referencia para comparar los parámetros obtenidos contra los de la simulación computacional.

Con la simulación energética se definieron los efectos de sus propiedades aislantes sobre el confort térmico y el consumo de energía [199]. Los datos climáticos de la zona térmica 3C que son: temperatura exterior, humedad relativa, dirección y velocidad del aire, energía y radiación solar, nubosidad y precipitación [200], se validaron con las asignadas por ASHRAE, dentro de la configuración del Design Builder que simplifica la información de todo el año meteorológico mediante cantidades numéricas específicas, [201-202].

La ubicación del terreno se definió con las indicaciones del constructor, tomando la orientación SO-NE del terreno donde se construirá la vivienda. Se evaluó el nivel de confort establecido para el verano, de no más de 25°C y para el invierno 21°C [203]; Se analizaron a través de un funcionamiento pasivo, tres indicadores: el número de horas en que se logra el confort térmico y el número de horas por arriba y por debajo del intervalo de confort, además del comportamiento y el balance térmico en los muros [112].

Estos indicadores se obtendrán por el análisis de la temperatura interior de la vivienda llamada temperatura operativa, considerada en 24 horas, por los 365 días de un año, en este estudio se consideró el comportamiento climático del 2021. Se consideró el cálculo de transferencia de calor, la transmisión del calor por conducción y la modelación dinámica de los intercambios térmicos. Se obtuvieron los indicadores de demanda y consumo de energías por HVAC [99], estimando el ahorro en el consumo de energía anual y el porcentaje de reducción por sistemas de climatización a través de los indicadores de un funcionamiento mecánico y mixto [100].

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Etapa I

4.1 Caracterización física y propiedades micro y macroestructurales de los materiales.

En este apartado se revisaron, contrastaron y analizaron los aspectos físicos de los materiales utilizados, su composición química que permitió corroborar sus características con respecto a las sugeridas en las diferentes normativas.

4.1.1 Distribución de los tamaños de las partículas.

Anhidrita

El porcentaje de anhidrita pasado por la malla 200, tamiz de 74 μm , permite conocer que este material tiene un 31.01% de agregado fino arenoso y el 68.99% es sólo agregado fino, de acuerdo con la ASTM C136, y de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), se obtuvo el coeficiente de uniformidad (Cu) de 6.7262 y el coeficiente de curvatura de 1.18 (Cc) que señala que la granulometría está bien graduada. Esto significa que tiene los porcentajes recomendados de agregados finos y arenosos.

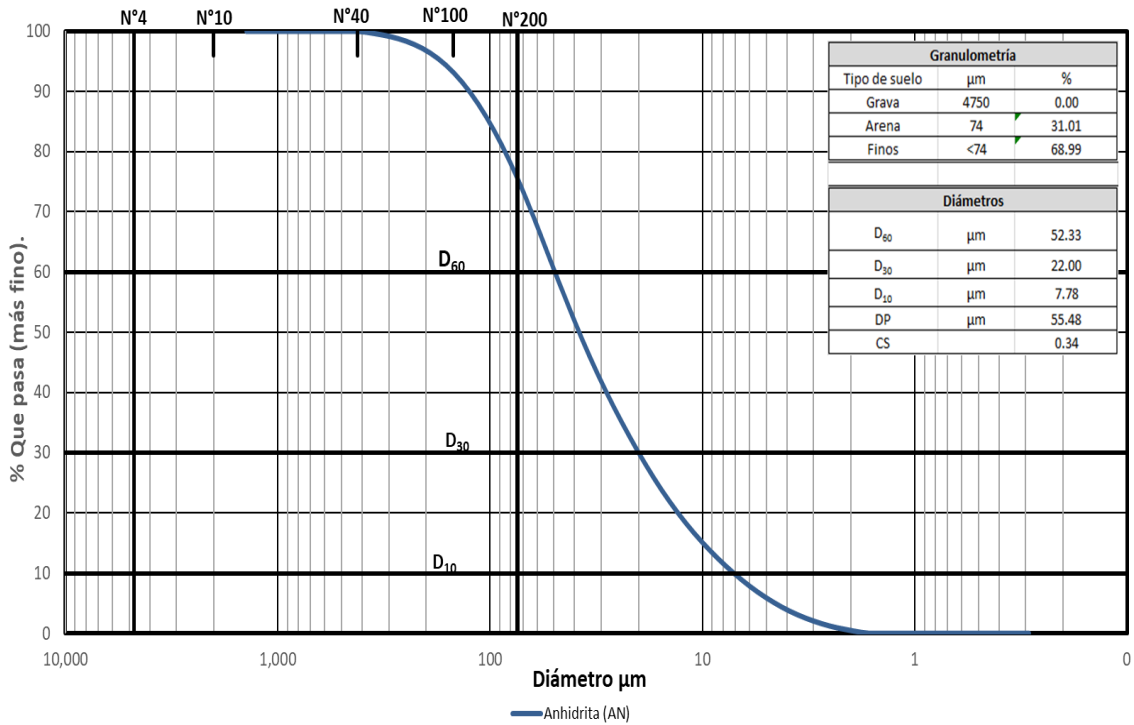
En cuanto a la distribución de sus tamaños, la AN llega a clasificarse en los niveles de limos y arcillas (MW ó CW) que son materiales que cuentan con la características de ser un sedimento de rocas y material orgánico, compuestos esencialmente de silicatos de aluminio hidratado que con el calor se deshidrata obteniendo un alto grado de dureza, **Tabla 27**.

De acuerdo con los resultados obtenidos por la dispersión del tamaño de partícula, el promedio de la dimensión es de 55.48 μm , **Gráfica 02**; con forma irregular y superficie calculada de 3.38×10^{-1} micras, por lo que se define que el material es fino en gran porcentaje y se hace visible con una gráfica asimétrica positiva de 0.48, con tendencia a tamaños menores y una curva leptocúrtica casi llegando al límite de la curva normal, donde los valores del tamaño de las partículas son de gran concentración, alrededor de la zona central e indica que las variaciones del tamaño de las partículas no es muy extenso, **Gráfica 03**.

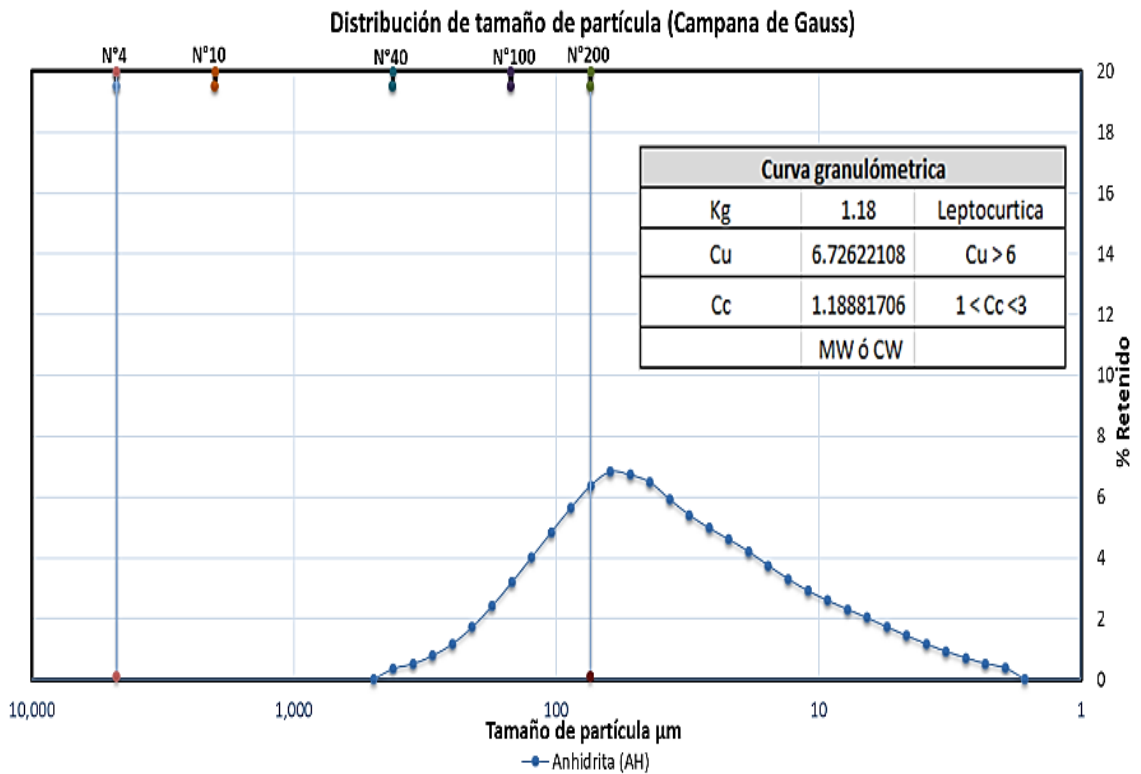
Se confirma que la anhidrita contiene aspectos de graduación heterogénea por el tamaño de sus partículas lo que le dá las características adecuadas que beneficia en la calidad de los compuestos, mejorando las propiedades mecánicas.

Tabla 27. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac.

Ensayo de Granulometría Anhidrita								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.00	100	62.23	6.84	68.99	2.75	0.71	1.61
1,184.00	0.00	100	52.33	6.73	62.15	2.31	0.52	0.9
995.60	0.00	100	44.00	6.49	55.42	1.95	0.38	0.38
837.20	0.00	100	37.00	5.93	48.93	1.64	0.00	0
704.00	0.00	100	31.11	5.41	43	1.38	0.00	0
592.00	0.00	100	26.16	4.98	37.59	1.16	0.00	0
497.80	0.00	100	22.00	4.61	32.61	0.97	0.00	0
418.60	0.35	100	18.50	4.21	28	0.82	0.00	0
352.00	0.51	99.65	15.56	3.75	23.79	0.69	0.00	0
296.00	0.78	99.14	13.08	3.31	20.04	0.58	0.00	0
248.90	1.17	98.36	11.00	2.92	16.73	0.49	0.00	0
209.30	1.72	97.19	9.25	2.60	13.81	0.41	0.00	0
176.00	2.41	95.47	7.78	2.31	11.21	0.34	0.00	0
148.00	3.19	93.06	6.54	2.03	8.9	0.29	0.00	0
124.50	4.01	89.87	5.50	1.73	6.87			
104.70	4.84	85.86	4.62	1.44	5.14			
88.00	5.65	81.02	3.89	1.17	3.7			
74.00	6.38	75.37	3.27	0.92	2.53			
		%			%			%
Tamiz	% Retenido	Que pasa	Tamiz	% Retenido	Que pasa	Tamiz	% Retenido	Que pasa



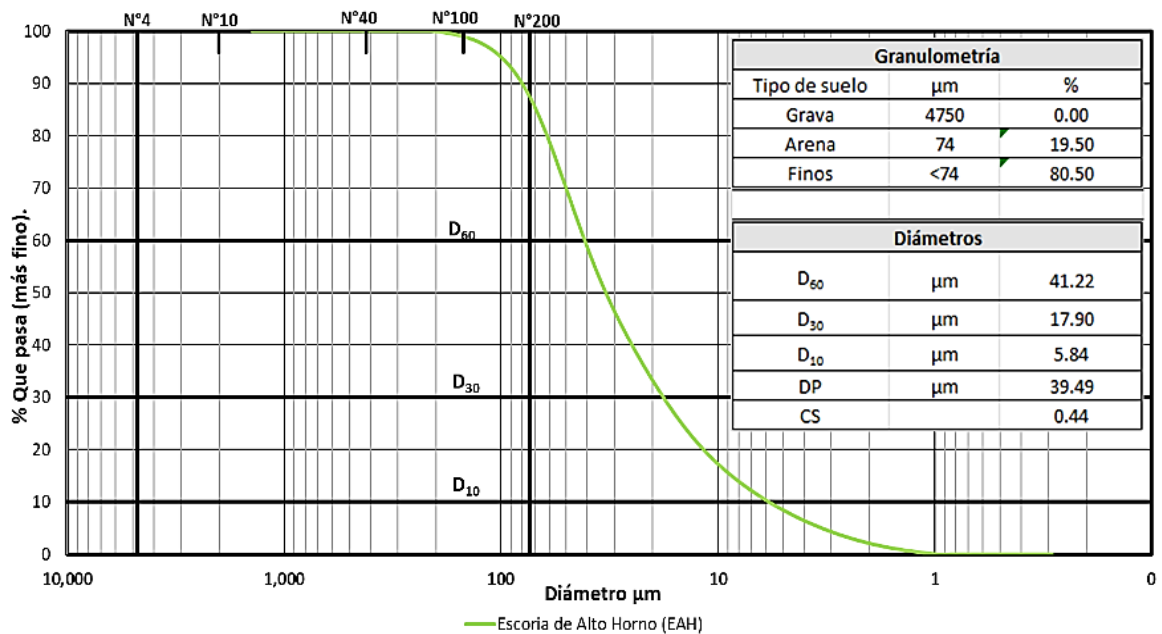
Gráfica 02. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac.



Gráfica 03. Campana de Gauss distribución de tamaños de partículas AN.

Escoria de alto horno.

Para cumplir los estándares establecidos para los tamaños de los cementantes en morteros, los gránulos de escoria se pasaron a un proceso de molienda, para obtenerse un porcentaje promedio máximo de $45\ \mu\text{m}$, señalado en la ASTM989. Esto se corroboró con el ensayo de dispersión de tamaño de partícula, donde se aprecia que el promedio alcanzado es de $39.49\ \mu\text{m}$ dimensión menor que la recomendada, **Gráfica 04**. Además, el 80.50% de material puede pasar a través de la malla 200 y el 19.50% es material fino arenoso, **Tabla 28**. Se considera, por lo tanto, que la EAH es un agregado fino arcilloso de forma irregular y superficie calculada en $0.44\ \mu\text{m}$.



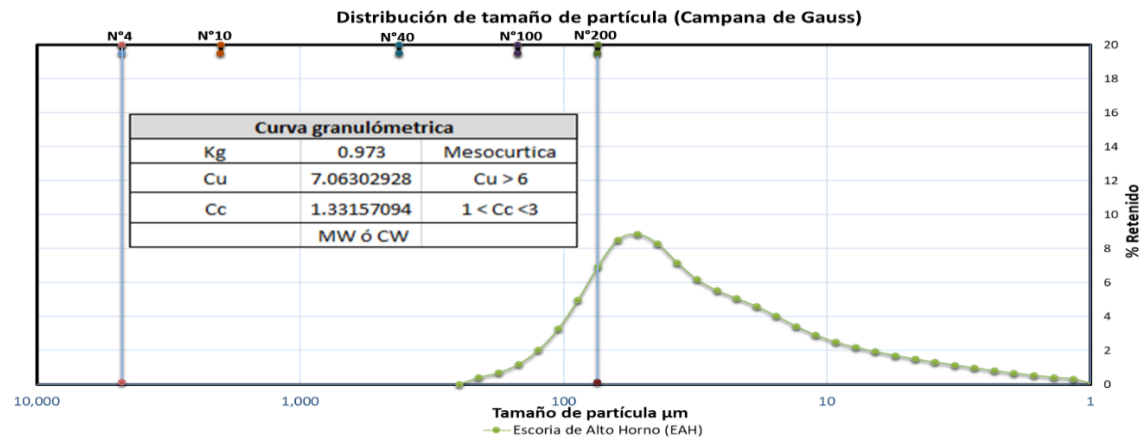
Gráfica 04. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac Escoria de alto horno.

La distribución del tamaño de partícula forma un gráfico de campana de Gauss mesocúrtica; por lo tanto, de condición normal, donde la parte central se

coloca de forma positiva a la izquierda, su punto medio está cercano al tamiz 200 y con una extensa variedad de tamaños que van desde 209.30 a 1.16 μm , **Tabla 28**. Los parámetros de coeficiente de uniformidad y el de curvatura se cumplen en la EAH, por lo que se determina que contiene las proporciones adecuadas de los diferentes tamaños de partículas y cuando se tiene esta condición se dice que está bien graduada. **Gráfica 05**.

Tabla 28. Porcentajes de material EscoriaM de Alto Horno que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac.

Ensayo de Granulometría Escoria de Alto Horno (EAH)								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.00	100	62.23	8.52	80.5	2.75	0.97	3.7
1,184.00	0.00	100	52.33	8.85	71.98	2.31	0.81	2.73
995.60	0.00	100	44.00	8.30	63.13	1.95	0.66	1.92
837.20	0.00	100	37.00	7.17	54.83	1.64	0.53	1.26
704.00	0.00	100	31.11	6.18	47.66	1.38	0.41	0.73
592.00	0.00	100	26.16	5.53	41.48	1.16	0.32	0.32
497.80	0.00	100	22.00	5.07	35.95	0.97	0.00	0
418.60	0.00	100	18.50	4.59	30.88	0.82	0.00	0
352.00	0.00	100	15.56	4.03	26.29	0.69	0.00	0
296.00	0.00	100	13.08	3.42	22.26	0.58	0.00	0
248.90	0.00	100	11.00	2.90	18.84	0.49	0.00	0
209.30	0.41	100	9.25	2.49	15.94	0.41	0.00	0
176.00	0.69	99.59	7.78	2.18	13.45	0.34	0.00	0
148.00	1.19	98.9	6.54	1.93	11.27	0.29	0.00	0
124.50	2.02	97.71	5.50	1.70	9.34			
104.70	3.27	95.69	4.62	1.49	7.64			
88.00	4.98	92.42	3.89	1.31	6.15			
74.00	6.94	87.44	3.27	1.14	4.84			
	%			%			%	
Tamiz	% Retenido	Que pasa	Tamiz	% Retenido	Que pasa	Tamiz	% Retenido	Que pasa



Gráfica 05. Campana de Gauss distribución de tamaños de partículas Escoria de Alto Horno.

Microsílice (MS)

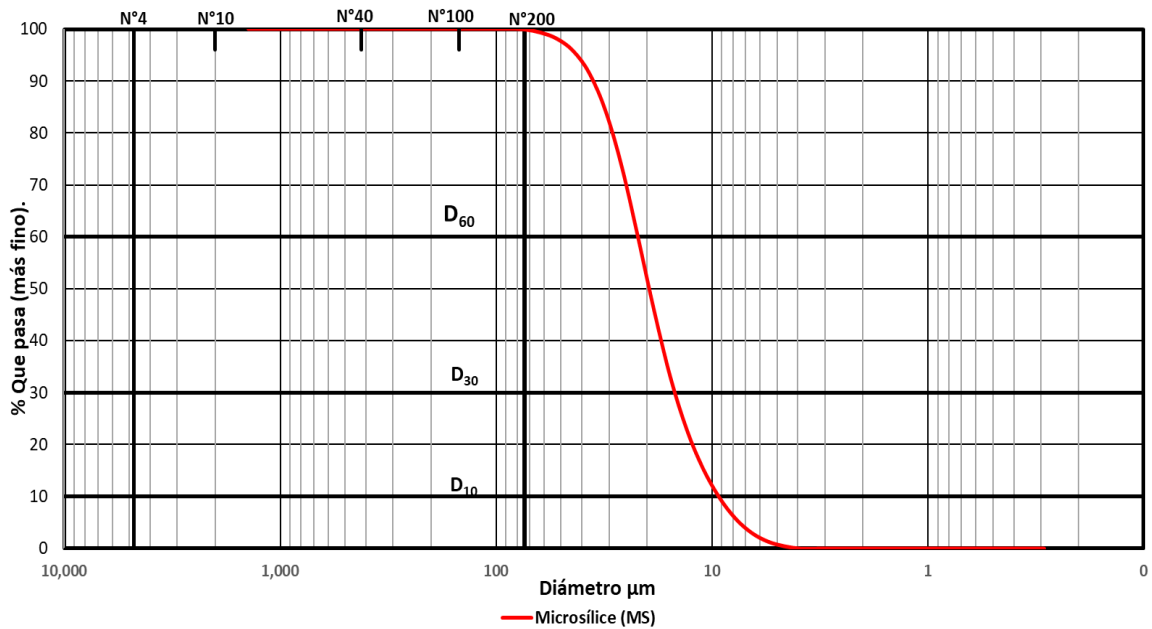
Con el estudio de distribución de tamaños de partícula se hace visible que la MS es el material con partículas de menor tamaño con respecto a los cementantes que se emplean dentro del MC estudiado. Las dimensiones de sus tamaños son menores que las del AS, condición que sugiere que su función dentro del compuesto será como activante ayudando a la resistencia por la densificación que se consigue con sus partículas. Esta puzolana contiene el 99.89% de material fino y solo el 0.11% de material fino arenoso, **Tabla 29**.

Tabla 29. Porcentajes de partículas de Microsílice que pasan por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac.

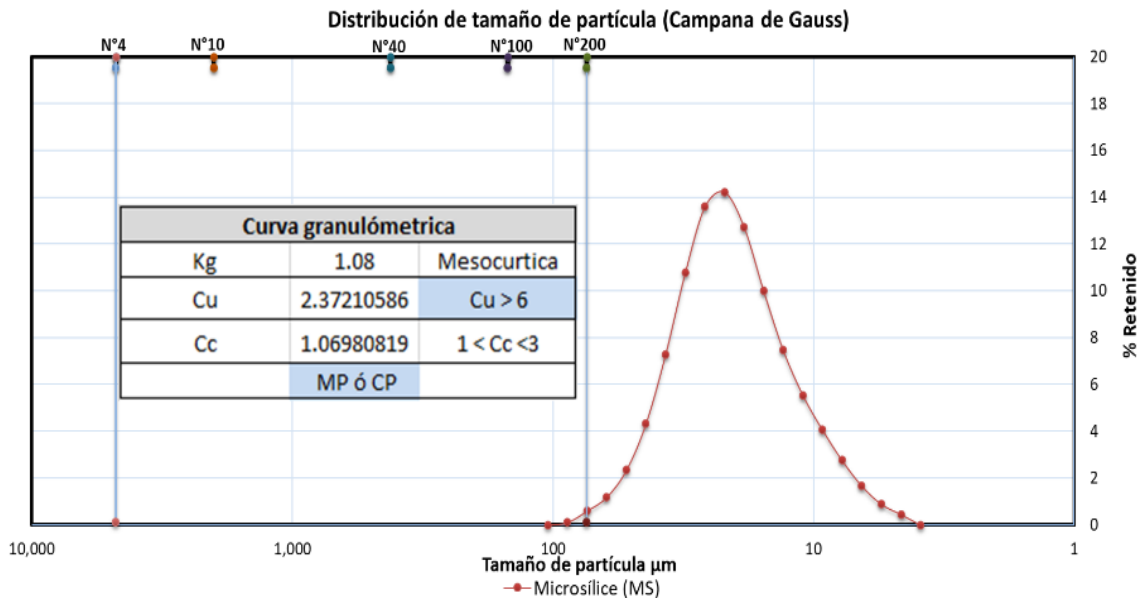
Ensayo de Granulometría Microsílice (MS)								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.00	100	62.23	1.19	99.29	2.75	0.00	0
1,184.00	0.00	100	52.33	2.34	98.1	2.31	0.00	0
995.60	0.00	100	44.00	4.33	95.76	1.95	0.00	0
837.20	0.00	100	37.00	7.28	91.43	1.64	0.00	0
704.00	0.00	100	31.11	10.77	84.15	1.38	0.00	0
592.00	0.00	100	26.16	13.59	73.38	1.16	0.00	0
497.80	0.00	100	22.00	14.23	59.79	0.97	0.00	0
418.60	0.00	100	18.50	12.73	45.56	0.82	0.00	0
352.00	0.00	100	15.56	10.00	32.83	0.69	0.00	0
296.00	0.00	100	13.08	7.46	22.83	0.58	0.00	0
248.90	0.00	100	11.00	5.54	15.37	0.49	0.00	0
209.30	0.00	100	9.25	4.06	9.83	0.41	0.00	0
176.00	0.00	100	7.78	2.76	5.77	0.34	0.00	0
148.00	0.00	100	6.54	1.67	3.01	0.29	0.00	0
124.50	0.00	100	5.50	0.89	1.34			
104.70	0.00	100	4.62	0.45	0.45			
88.00	0.11	100	3.89	0.00	0			
74.00	0.60	99.89	3.27	0.00	0			
	%	%		%			%	%
Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	% Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa

En lo que respecta a la campana de su curva, se describe que las partículas no presentan gran variedad en las dimensiones de partícula, de los 50 tamices considerados en el ensayo sólo en 18 se presentan las partículas, por lo que se forma un halo pronunciado que arroja que el promedio del tamaño es de

21.44 μm , con una forma mesocúrtica de comportamiento normal, donde el coeficiente de uniformidad al no cumplir con ser mayor que 6, se considera que su graduación es pobre, con un contenido mayor de partículas pequeñas, **Tabla 29, Gráfica 06 y Gráfica 07.**



Gráfica 06. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac, MS.



Gráfica 07. Campana de Gauss distribución de tamaños de partículas MS.

Aerogel de Sílice.

Para esta investigación se propone experimentar con 4 tipos de tamaños de partículas del AS (A1000, A3120, A3110 y A3100), para evaluar los beneficios que se consiguen con algún tamaño en específico y sus comportamientos en el mortero.

Se percibe que los tamaños de partículas se concentran de 15 a 18 tamices en un total de 50, sólo en el A1000, se observa una distribución de tamaños mayor hasta de 23 tamices, **Tabla 30, 31, 32 y 33.**

Tabla 30. Tamaños de partículas de Aerogel A1000, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.

Ensayo de Granulometría Aerogel de sílice A1000								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.62	100	62.23	1.57	5.22	2.75	0.00	0
1,184.00	1.07	99.38	52.33	1.38	3.65	2.31	0.00	0
995.60	3.51	98.31	44.00	1.08	2.27	1.95	0.00	0
837.20	6.95	94.8	37.00	0.74	1.19	1.64	0.00	0
704.00	10.52	87.85	31.11	0.45	0.45	1.38	0.00	0
592.00	13.00	77.33	26.16	0.00	0	1.16	0.00	0
497.80	13.29	64.33	22.00	0.00	0	0.97	0.00	0
418.60	11.52	51.04	18.50	0.00	0	0.82	0.00	0
352.00	8.56	39.52	15.56	0.00	0	0.69	0.00	0
296.00	5.96	30.96	13.08	0.00	0	0.58	0.00	0
248.90	4.29	25	11.00	0.00	0	0.49	0.00	0
209.30	3.34	20.71	9.25	0.00	0	0.41	0.00	0
176.00	2.77	17.37	7.78	0.00	0	0.34	0.00	0
148.00	2.34	14.6	6.54	0.00	0	0.29	0.00	0
124.50	1.99	12.26	5.50	0.00	0			
104.70	1.76	10.27	4.62	0.00	0			
88.00	1.66	8.51	3.89	0.00	0			
74.00	1.63	6.85	3.27	0.00	0			
Tamiz	% Retenido	% Que pasa	Tamiz	% Retenido	% Que pasa	Tamiz	% Retenido	% Que pasa

Tabla 31. Tamaños de partículas de Aerogel A3120, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.

Ensayo de Granulometría Aerogel de sílice A3120								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.00	100	62.23	9.40	22.86	2.75	0.00	0
1,184.00	0.00	100	52.33	6.05	13.46	2.31	0.00	0
995.60	0.00	100	44.00	3.61	7.41	1.95	0.00	0
837.20	0.00	100	37.00	2.07	3.8	1.64	0.00	0
704.00	0.00	100	31.11	1.14	1.73	1.38	0.00	0
592.00	0.00	100	26.16	0.59	0.59	1.16	0.00	0
497.80	0.10	100	22.00	0.00	0	0.97	0.00	0
418.60	0.39	99.9	18.50	0.00	0	0.82	0.00	0
352.00	0.56	99.51	15.56	0.00	0	0.69	0.00	0
296.00	0.89	98.95	13.08	0.00	0	0.58	0.00	0
248.90	1.57	98.06	11.00	0.00	0	0.49	0.00	0
209.30	2.94	96.49	9.25	0.00	0	0.41	0.00	0
176.00	5.39	93.55	7.78	0.00	0	0.34	0.00	0
148.00	8.96	88.16	6.54	0.00	0	0.29	0.00	0
124.50	12.80	79.2	5.50	0.00	0			
104.70	15.27	66.4	4.62	0.00	0			
88.00	15.31	51.13	3.89	0.00	0			
74.00	12.96	35.82	3.27	0.00	0			
	%	%		%	%		%	%
Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa

Tabla 32. Tamaños de partículas de Aerogel A3110, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.

Ensayo de Granulometría Aerogel de sílice A3110								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.00	100	62.23	10.81	24.35	2.75	0.00	0
1,184.00	0.00	100	52.33	6.45	13.54	2.31	0.00	0
995.60	0.00	100	44.00	3.57	7.09	1.95	0.00	0
837.20	0.00	100	37.00	1.94	3.52	1.64	0.00	0
704.00	0.00	100	31.11	1.04	1.58	1.38	0.00	0
592.00	0.00	100	26.16	0.54	0.54	1.16	0.00	0
497.80	0.00	100	22.00	0.00	0	0.97	0.00	0
418.60	0.00	100	18.50	0.00	0	0.82	0.00	0
352.00	0.11	100	15.56	0.00	0	0.69	0.00	0
296.00	0.51	99.89	13.08	0.00	0	0.58	0.00	0
248.90	0.96	99.38	11.00	0.00	0	0.49	0.00	0
209.30	1.92	98.42	9.25	0.00	0	0.41	0.00	0
176.00	3.86	96.5	7.78	0.00	0	0.34	0.00	0
148.00	7.23	92.64	6.54	0.00	0	0.29	0.00	0
124.50	11.84	85.41	5.50	0.00	0			
104.70	16.14	73.57	4.62	0.00	0			
88.00	17.65	57.43	3.89	0.00	0			
74.00	15.43	39.78	3.27	0.00	0			
	%	%		%	%		%	%
Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa

Tabla 33. Tamaños de partículas de Aerogel A3100, datos obtenidos en el ensayo de distribución de tamaños de partículas.

Ensayo de Granulometría Aerogel de sílice A3100								
Finos arenosos			Finos			Finos		
1,408.00	0.00	100	62.23	13.09	27.62	2.75	0.00	0
1,184.00	0.00	100	52.33	7.48	14.53	2.31	0.00	0
995.60	0.00	100	44.00	3.78	7.05	1.95	0.00	0
837.20	0.00	100	37.00	1.88	3.27	1.64	0.00	0
704.00	0.00	100	31.11	0.94	1.39	1.38	0.00	0
592.00	0.00	100	26.16	0.45	0.45	1.16	0.00	0
497.80	0.00	100	22.00	0.00	0	0.97	0.00	0
418.60	0.00	100	18.50	0.00	0	0.82	0.00	0
352.00	0.00	100	15.56	0.00	0	0.69	0.00	0
296.00	0.41	100	13.08	0.00	0	0.58	0.00	0
248.90	0.71	99.59	11.00	0.00	0	0.49	0.00	0
209.30	1.37	98.88	9.25	0.00	0	0.41	0.00	0
176.00	2.75	97.51	7.78	0.00	0	0.34	0.00	0
148.00	5.40	94.76	6.54	0.00	0	0.29	0.00	0
124.50	9.71	89.36	5.50	0.00	0			
104.70	15.05	79.65	4.62	0.00	0			
88.00	18.84	64.6	3.89	0.00	0			
74.00	18.14	45.76	3.27	0.00	0			
	%	%		%	%		%	%
Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa	Tamiz	Retenido	Que pasa

Las partículas del AS son irregulares en todas sus presentaciones, son transparentes y el porcentaje mayor de tamaño de partículas está en el intervalo de agregados finos arenosos que son retenidos antes de la malla 200. El tamaño A1000 cuenta con un 94.78% dentro de esta clasificación y un promedio de tamaño de 424.40 μm , por lo tanto, es el material que presenta las partículas de mayor tamaño dentro del MC, comparándolo con todos los cementantes y agregados utilizados.

Los aerogeles A3120, A3110 y A3100, tienen distribuciones y tamaños similares, con un intervalo de 77.14, 75.65 y 75.65% de finos arenosos y

diámetros promedio de 97.46, 89.06 y 83.68 μm , respectivamente. El comportamiento de la distribución de tamaños en estos tres tipos de aerogeles es muy similar, el material fino es casi del mismo porcentaje y tamaños de partículas, **Gráfica 08**.

La distribución de partículas de los aerogeles A3120, A3110 y A3100 son concentradas en pocos tamaños, por lo que presentan en las gráficas halos pronunciados, teniendo el punto central en los parámetros de finos arenosos; además, se determina que la forma de su curtosis es clasificada en leptocúrticas, por no cumplir las condiciones del coeficiente de uniformidad.

En lo que respecta al aerogel A1000 es muy distinto, su gráfica es mesocúrtica positiva, con un amplio intervalo de tamaños y el porcentaje mayor de partículas se clasifican como finos arenosos, similares a los utilizados por Buratti [79], **Figura 55** y **Gráfica 09**.

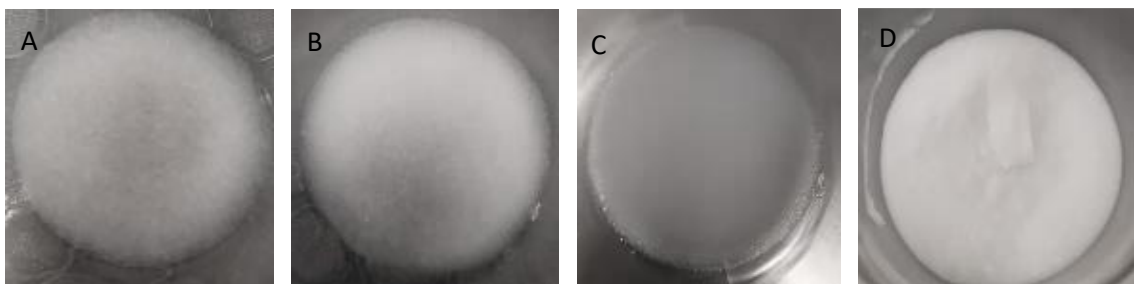
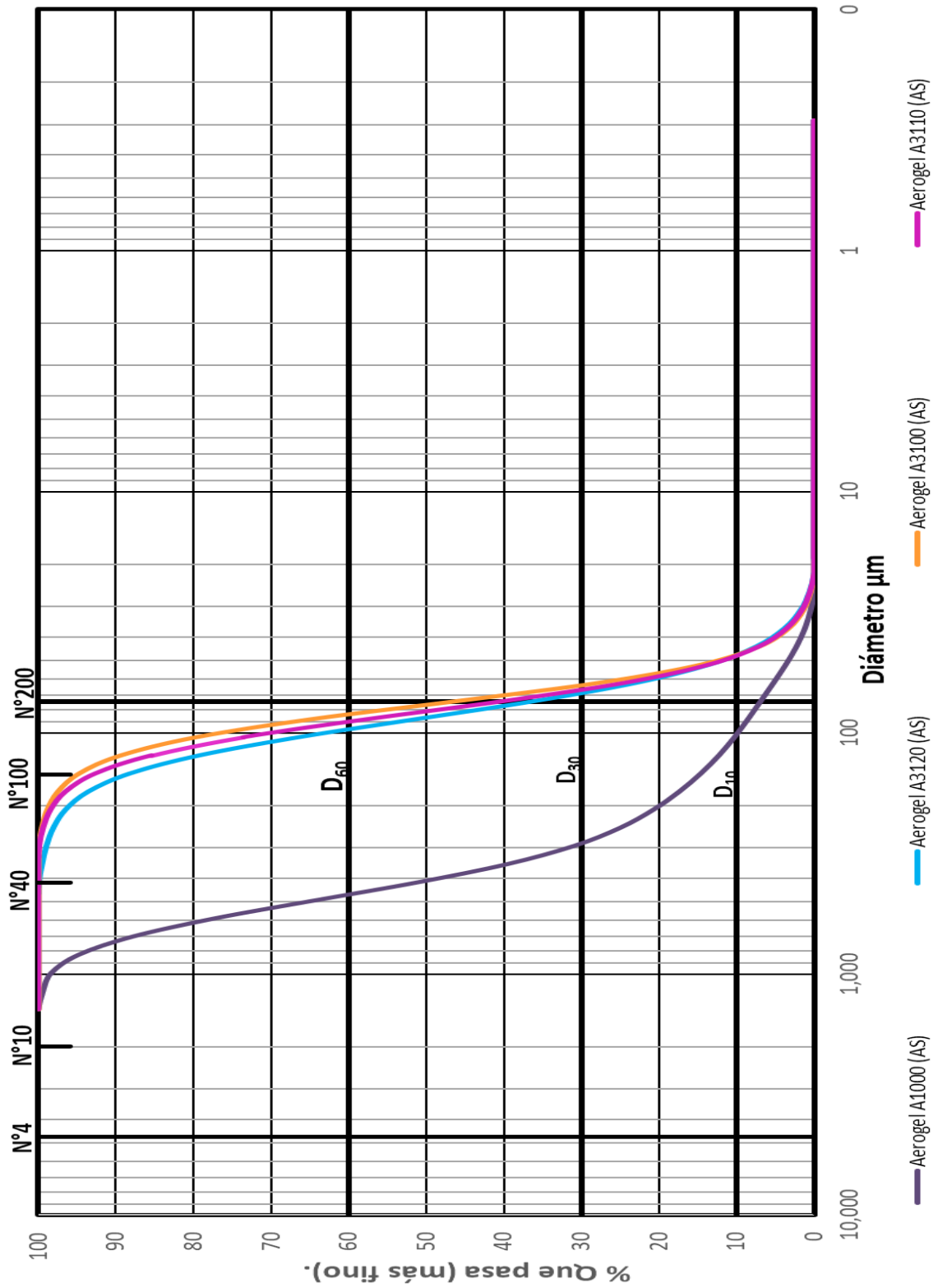
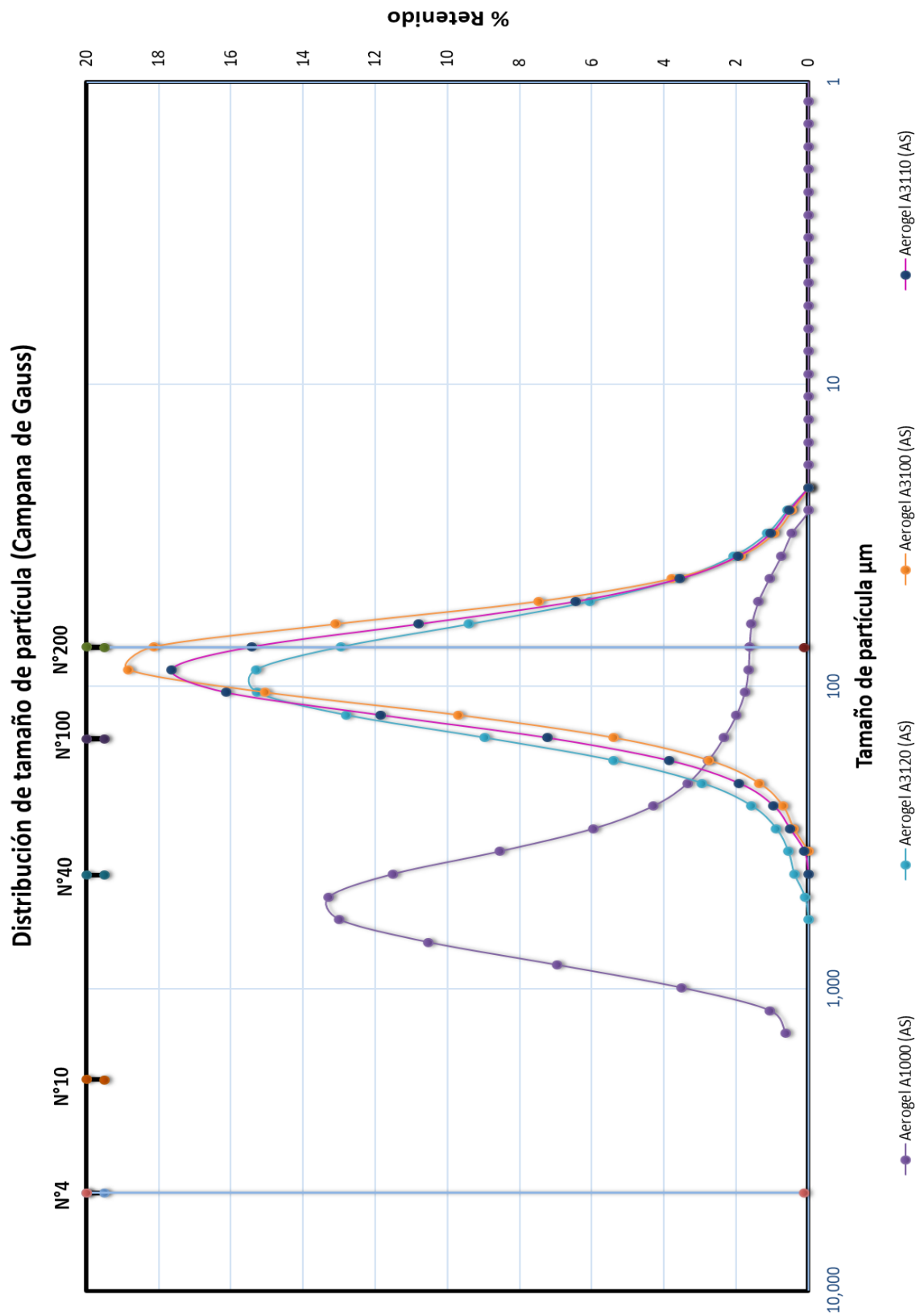


Figura 55. A) AS A1000; B) AS 3120 01-1.2 mm; C) AS 3110 0.1–07 mm; y D) AS 3100 0.002-0.04 mm.



Gráfica 08. Porcentajes de material que pasa por los diversos tamices durante el ensayo de Distribución de tamaños de partículas elaborado por Microtrac AS A3120, A3110, A3100 y A1000.

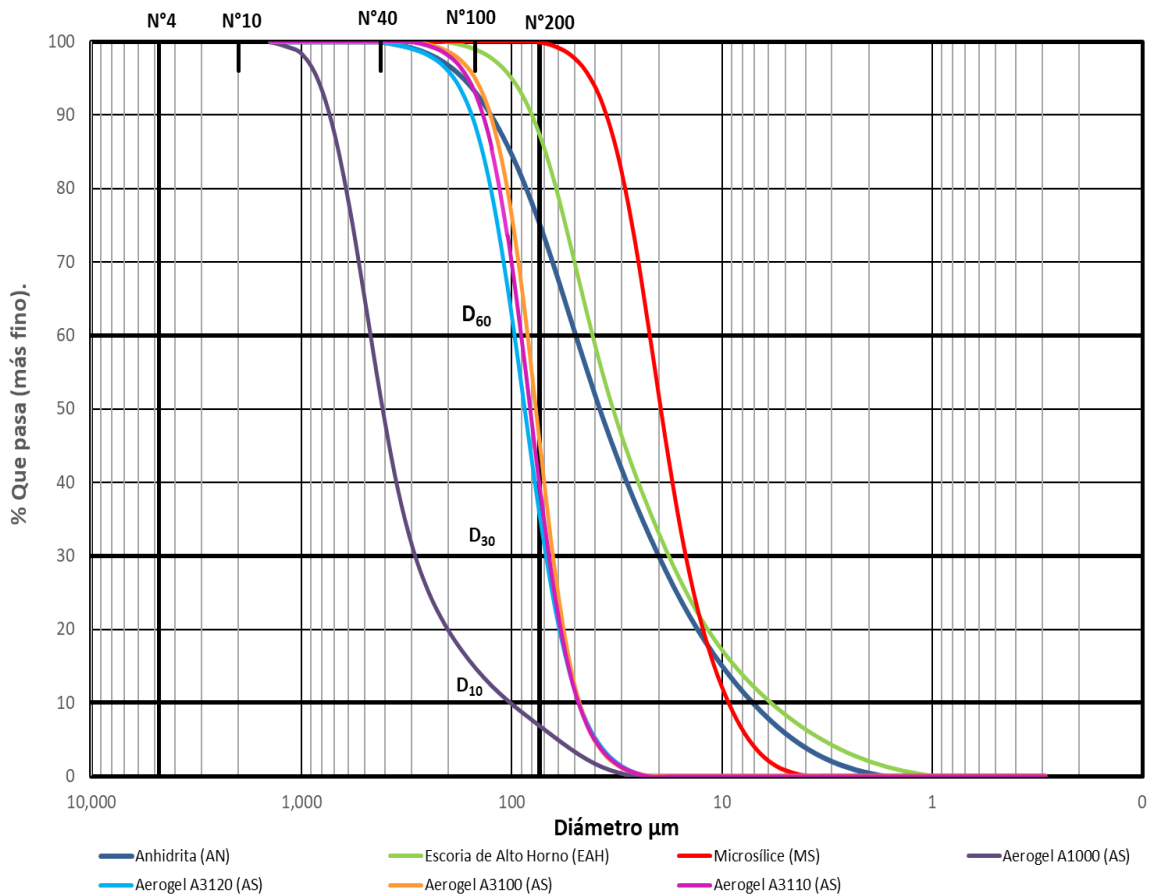


Gráfica 09. Campana de Gauss distribución de tamaños de partículas AS A3120, A3110, A3100 y A1000.

Compuesto AN+EAH+MS+AS

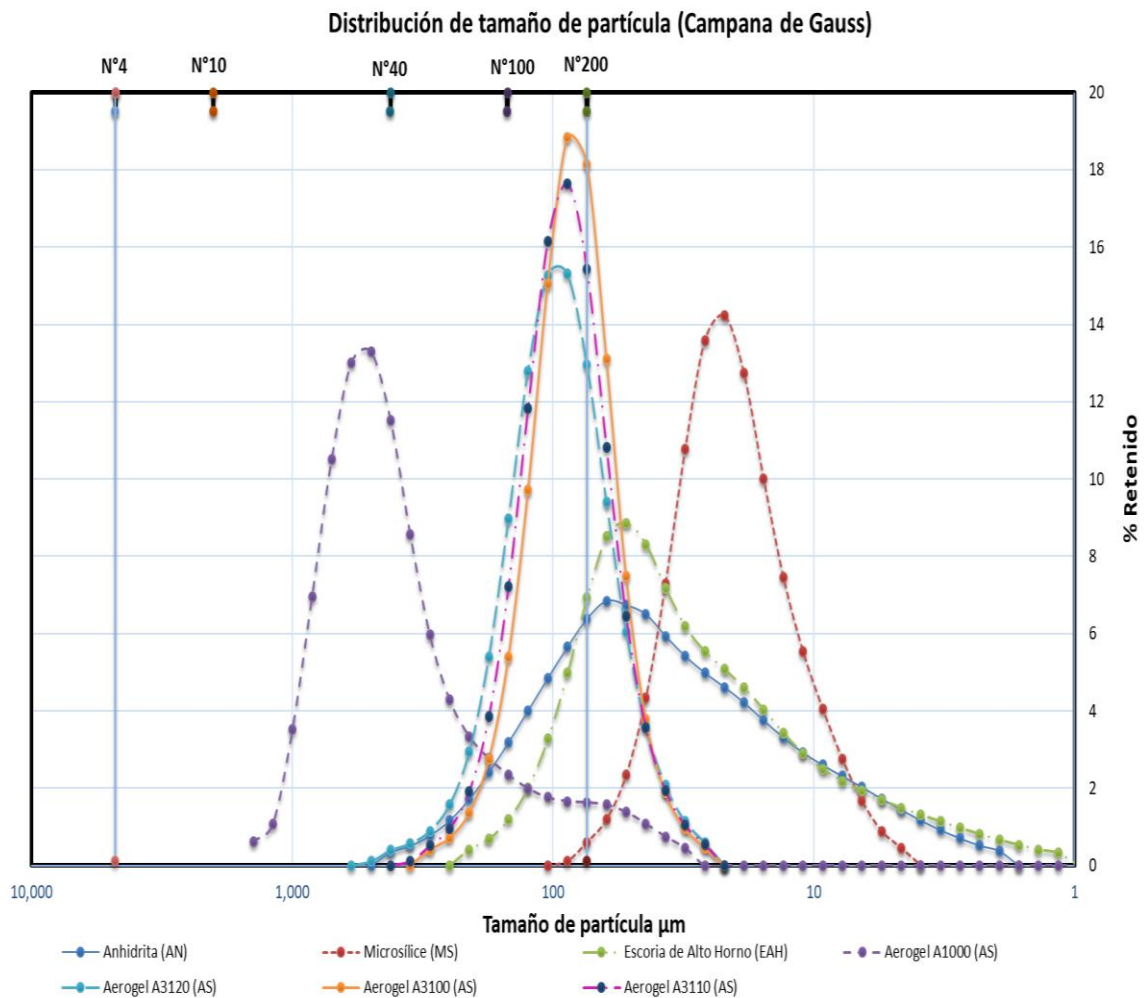
Los cementantes que se utilizan en esta investigación (AN, EAH y MS) están en la clasificación de finos arcillosos, con porcentajes que van desde 68 hasta un 99 %, conteniendo hasta el 60% de partículas menores que 20 μm , en el caso de la Microsílice.

Los agregados de partículas de aerogel, en todos sus tamaños, corresponden a finos arenosos retenidos en la malla 200, con tamaños de 72 hasta 94 μm y en el caso de A1000, con partículas hasta de 1,408 μm y promedio de 424 μm las de mayor dimensión, **Gráfica 10**.



Gráfica 10. Distribución de tamaños de partículas de materiales cementantes y agregados AN+EAH+MS+AS.

La **Gráfica 11** muestra el esquema de las curvas correspondientes a los materiales que se utilizaron en el mortero, en el intervalo de los finos arenosos se ubican los agregados como las partículas de AS en todas sus presentaciones utilizadas, mientras en el otro intervalo se encuentran los cementantes ubicados como agregados finos. Los materiales cementantes son los que presentan un intervalo amplio de tamaños de partículas, mientras los agregados muestran pocos tamices y concentración de tamaños.



Gráfica 11. Campana de Gauss distribución de tamaños de partículas Cementantes y agregados AN+EAH+MS+AS.

4.1.2 Densidad de los materiales.

Se obtuvieron las densidades y la composición química elemental de los materiales para contrastarlos con los utilizados por otros autores, **AN** [204], [205], [27] [206], **MS** [207] [208], **AS** [209] [25] y **EAH** [210] [211] [212] [213], **Tabla 34 y 35.**

La densidad de la AN es la mayor de los cementantes, mientras que la del MS es la menor, con un 20% menos. En cuanto a la densidad del AS, se tomaron las densidades aparentes obtenidas con el picnómetro de Helio, para obtenerse una relación de porcentaje que por medio de la densidad del AS A 1000, se obtuvo la densidad real que considera la porosidad de las partículas de los cuatro tamaños de AS, para poderse proporcionar dentro de la mezcla del MC.

Tabla 34. Densidades obtenidas por medio del Picnómetro de Helio.

Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción											
UANL UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN		Picnómetro Power Pycnometry (Micromeritics, GeoPyc1360)						FIC FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL			
Determinación de densidad											
Muestra	(grs) Peso de la muestra	P1	P2	Volumen de la muestra Corrida			Volumen Promedio	Densidad de la muestra Corrida			Densidad Aparente
				1	2	3		1	2	3	
Anhidrita	10.4023	17.157	5.502	3.6926	3.6783	3.6689	3.68	2.8170	2.828	2.8352	2.83
		17.008	5.452								
		17.128	5.489								
EAH	13.0641	17.080	5.632	4.6593	4.6845	4.6401	4.66	2.8039	2.7888	2.8155	2.80
		17.128	5.652								
		17.041	5.616								
Microsilice	4.4637	17.040	5.206	1.9453	1.9643	1.9629	1.96	2.2946	2.27	2.274	2.28
		17.027	5.205								
		17.009	5.199								
Aerogel A1000	1.0101	17.218	5.026	0.2227	0.2423	0.223	0.23	4.5359	4.1687	4.5296	4.41
		17.086	4.990								
		17.050	4.977								
Aerogel A3120	1.0505	17.114	5.004	0.2873	0.2987	0.2738	0.29	3.6569	3.517	3.8362	3.67
		17.089	4.997								
		17.031	4.978								
Aerogel A3110	0.9252	17.084	4.984	0.2003	0.2161	0.2443	0.22	4.6188	4.2815	1.7872	3.56
		17.125	4.998								
		17.068	4.985								
Aerogel A3100	0.5349	17.125	4.995	0.1929	0.2097	0.1604	0.19	2.7734	2.5511	3.3348	2.89
		17.097	4.989								
		17.033	4.964								

Tabla 35. Densidades de las partículas de AS para su proporcionamiento en pastas y morteros.

	Densidad Aparente	Porcentaje	Densidad Real (kg/m ³)	Densidad Real (g/cm ³)
A3120	3.67	0.83	149.75	0.15
A3110	3.56	0.81	145.36	0.14
A3100	2.89	0.65	117.78	0.12
A1000	4.41	1.00	180.00	0.18

La densidad aparente obtenida del AS es el resultado de dividir la masa del material y el volumen del mismo, mientras que la densidad real resulta de dividir la masa y el volumen real ocupado, considerando el espacio poroso de las partículas. Los resultados fueron similares a los reportados por *Koebel* [82], con una diferencia entre ambas densidades de un 59%, por la porosidad del AS.

4.1.3 Fluorescencia de rayos X.

La comparación de los componentes químicos elementales de cada uno de los materiales afirma que tienen las mismas características que los empleados en otras investigaciones de referencia, **Tabla 36, 37, 38, 39 y 40.**

Tabla 36. Composición química elemental AN.

Compuesto óxidos	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	Otros
En estudio	0.20	0.33	1.50	65.70	0.20	31.80	-	-	-	0.27
Winnefeld (2017)	0.08	0.33	0.82	54.83	0.05	42.83	0.20	0.81	0.01	0.04
Wolf (2020)	1.30	0.20	0.20	53.70	0.20	41.10	0.20	0.20	-	2.90
Cossio (2016)	0.19	0.42	0.95	56.85	-	39.40	0.12	0.07	-	2.00
Poon	1.57	0.04	1.88	51.00	-	37.94	0.02	-	-	7.55
Concentración	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Tabla 37. Composición química elemental MS.

Compuesto óxidos	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	Otros
En estudio	0.12	0.36	99.06	0.17	0.17	-	0.30
Biskri (2017)	0.01	0.03	99.01	0.15	0.02	0.04	0.74
Ahmad (2019)	1.78	0.72	92.50	0.84	0.48	0.50	3.18
Gesoglu (2015)	-	0.71	90.36	1.52	0.45	0.45	6.51
Hot (2015)	2.13	1.31	96.50	0.03	0.03	-	-
Hanif (2016)	-	-	98.45	0.31	0.77	-	0.47
B.National (2015)	-	-	>85		<1	-	-
Concentración	%	%	%	%	%	%	%

Tabla 38. Composición química elemental AS.

Compuesto óxidos	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Otros
En estudio	-	0.20	99.40	0.30	0.10
Serina Ng (2016)	-	-	>97	-	-
Concentración	%	%	%	%	%

Tabla 39. Composición química elemental EAH.

Compuesto óxidos	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Otros	Mb >1	Kq >1.4
En estudio	5	6	57	3	0	27	1	0		0.51	0.6554
Burciaga (2018)	8	10	32	-	1	42	2	1	5	1.18	1.7514
Ding (2015)	7	16	31	-	-	40	3	-	2	0.99	1.8742
Dhmees (2019)	8	14	35	3	-	40	0	0		0.97	1.7772
Liu (2019)	9	13	29	-	-	43	1	0	4	1.20	2.0861
Wang (2018)	8	14	35	-	-	41	0	1	1	0.99	1.8092
Fickler (2015)	5-14%	8-16%	33-37%	-	-	34-43%	-	0.3-2%			
Concentración	%	%	%	%	%	%	%	%			

Tabla 40. Composición química elemental y densidad de componentes AN+EAH+MS+AS

	AN [200,201,27,202]	EAH [208,209,210,211]	MS [203,204,205,206]	AS [207,25]
Óxido de Magnesio (MgO)	0.2	4.9	0.1	0.0
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	0.3	5.9	0.4	0.2
Dióxido de silicio (SiO ₂)	1.5	56.5	99.1	99.4
Trióxido de Sulfuro (SO ₃)	65.7	3.3	0.0	0.0
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.2	0.5	0.2	0.0
Óxido de Calcio (CaO)	31.8	27.5	0.2	0.0
Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	0.0	0.2	0.0	0.0
Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.0	1.0	0.0	0.0
Óxido de Estroncio (SrO)	0.1	0.0	0.0	0.0
Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0.0	0.0	0.0	0.3
Óxido de Manganeso (MnO)	0.0	0.0	0.0	0.0
Otros	0.2	0.3	0.1	0.1
Densidad (g/cm ³)	2.83	2.8	2.28	0.15 - 0.18

La EAH fue el único elemento que presentó diferencias significativas con respecto al porcentaje de CaO y Al₂O₃, en un 21 y 25% menos del mínimo recomendado para que el material presente las condiciones o factores de basicidad (Mb) y coeficiente de calidad (Kq) que son indispensables para la reactividad y la reacción de la EAH [82]. En el caso del SiO₂, sobrepasa el porcentaje máximo de 37%, alcanzando el 57% de todo el volumen, **Tabla 40**.

Los cálculos indican que la EAH utilizada presenta índices de Mb =0.51 y Kq =0.66, menores que 1 y 1.4 respectivamente, que son los mínimos recomendados para estas propiedades [27]. El porcentaje que se requiere de CaO es del 34 a 43%, por lo que el 27% lo hace insuficiente para alcanzar a cubrir con estas condiciones; por tal motivo, se realizó un estudio que consiste en adicionar la proporción faltante de CaO y analizar si se mejoran las propiedades mecánicas en el mortero.

4.1.4 Estudio de adición de CaO para mejorar la basicidad y calidad de la EAH.

Se elaboraron dos muestras con diferentes composiciones: la muestra con el MC (AN+EAH+MS) y la segunda MC+CaO (AN+EAH+MS+CaO). Se estimó el material faltante de CaO por lo que se adicionó al MC el 30.27% más de este elemento, **Tabla 41**. Posteriormente se ensayaron las muestras a las edades de 1, 7, 14 y 28 días, para comparar su comportamiento mecánico de resistencia a la compresión, **Gráfica 12**.

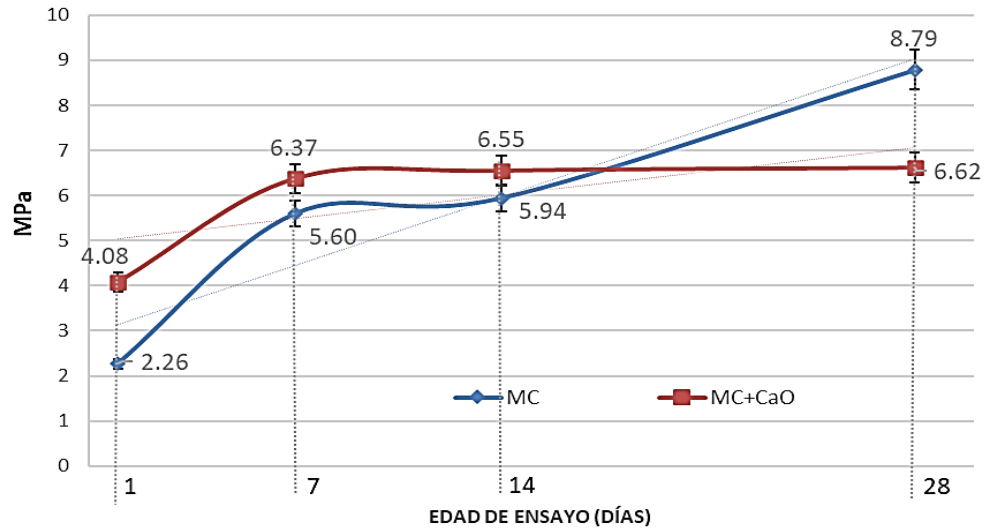
Tabla 41. Diseño de morteros para estudio de adición de CaO (g) para complemento de la EAH.

Codigo de Muestra		C1	C2	C3	C4	Act C1	Act C2	Act C3	Arena Sílica	Agua
		AN	EAH	MS	CaO	K ₂ SO ₄	Ca(OH) ₂	Cemento		
		70%	25.50%	4.50%	30.27 % C2	3%	4%	7%	2.75% C1,C2,C3 y C4	65% Cem+Act
Mortero AN+EAH+MS	MC	450	164	29	0	14	18	11	1,768	446
Mortero AN+EAH+MS Óxido de Calcio	MC+CaO	450	114	29	50	14	18	11	1,768	446

Se complementa el Óxido de Calcio faltante en la Escoria de Alto Horno para alcanzar los niveles basicidad y reactividad estandarizada, C1, C2, C3 y C4 son los cementantes empleados, Act C1, C2 y C3 sus activantes respectivamente.

La muestra adicionada MC+CaO presentó resistencias a la compresión de 45% más que el MC a la edad de 1 día; mientras tanto, a los 7 y 14, este porcentaje se reduce al 12 y al 9%, disminuyendo la diferencia en la resistencia entre ambos morteros. Este comportamiento se modifica a la edad de 28 días, observándose que el MC obtuvo un mejor comportamiento hasta de un 25% más

que las muestras con adición de óxido de calcio, alcanzando una resistencia de 8.79 comparado con 6.62 MPa, **Gráfica 12**.



Gráfica 12. Gráfico de resultados de ensayo de resistencia a la compresión con muestras cúbicas de 2''X2''.

Estos resultados muestran que la EAH tuvo una mejor reacción a una edad mayor, alcanzando su mejor comportamiento a los 28 días, siendo esto una característica de este material, pues se sabe que reacciona al paso del tiempo hasta alcanzar su mejor comportamiento a los 28 días [33]. Por lo tanto, este estudio permitió saber que la EAH se utilizará sin agregarle CaO al compuesto en los posteriores estudios.

4.1.5 Análisis mineralógico

Los difractogramas muestran los espectros característicos de materiales amorfos en la AN, EAH, MS y AS. Sus composiciones esenciales y la presencia de algunos cristales con intensidades bajas, en el caso de la EAH presenta cristales de Calcita [27] [171] y en el Microsilíce de Óxido de Silicio, cristales de Cuarzo, [214] [170]. El aerogel es un material puro, sin contaminantes de

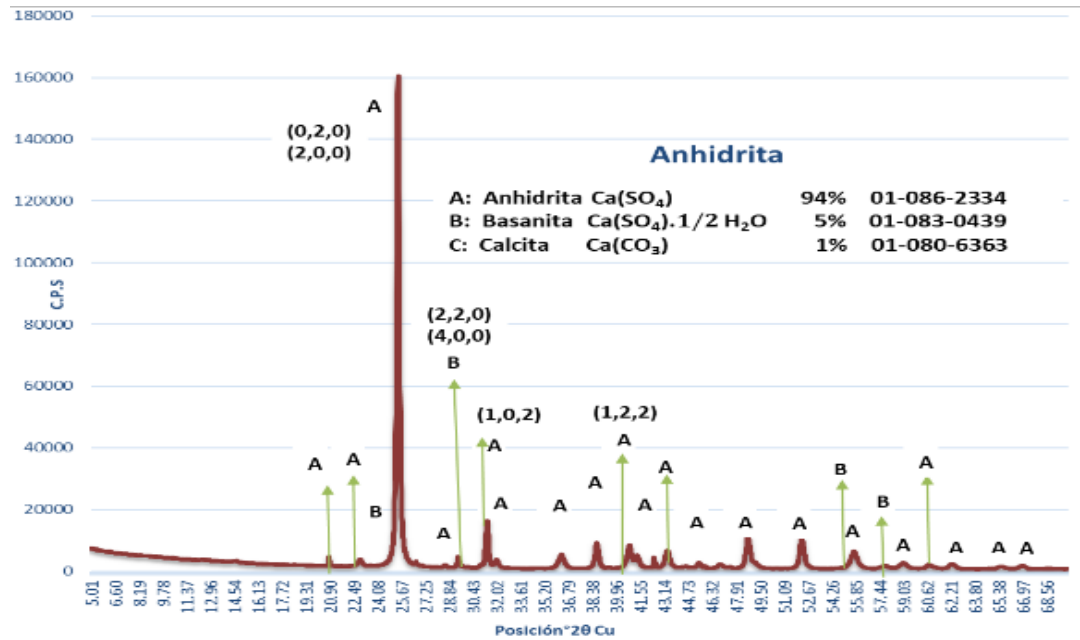
naturaleza amorfa [215] [170] y la AN presenta los cristales e intensidades correspondientes a las fases anhidrita, basanita y calcita [27] [216].

Anhidrita.

El estudio de difracción de rayos X muestra que el material se encuentra integrado por un 94% de Sulfato de Calcio en fase de Anhidrita $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ con código de referencia 01-80-6363 y colección ICSD 183919 (ver anexo II). Los elementos Basanita o sulfato de Calcio hemi-hidratado $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ y calcita, llamada también carbonato de Calcio $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, representan el 5 y el 1% respectivamente, elementos que se identifican por los códigos 01-083-0439 y 01-086-2334 (ver anexo II). Los tres compuestos son clasificados como minerales naturales, cerámicos, que forman parte del proceso de hidratación del mortero.

Se observa un espectro continuo que se ubica de 5 a $20^\circ(2\theta)$, con fases minerales menores y disminuidas por la intensidad de los picos principales, que corresponden a la anhidrita, localizados a los 25.42° , con dos diferentes planos de cristal (0,2,0) y (2,0,0), que se manifiestan en forma concentrada. Los picos que le siguen son de la anhidra, igualmente, a los 31.35 y $40.80^\circ(2\theta)$, **Grafica 13.**

Por el contenido de basanita y calcita, sus picos son poco perceptibles. Los de mayor porcentaje se encuentran a los 14.74 y $29.40^\circ(2\theta)$ respectivamente. La anhidrita presenta los parámetros de celda unitaria de $a=7.00$, $b=6.99$ y $c=6.24 \text{ \AA}$, de estructura Ortorrómbica, con $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$ y $\gamma=90^\circ$, con una fase similar a la establecida por Sanz Pont (2016) para la anhidrita II, obtenida de los $500 - 700^\circ\text{C}$ de Calcinación [25], **Figura 56.**



Gráfica 13. DRX AN.

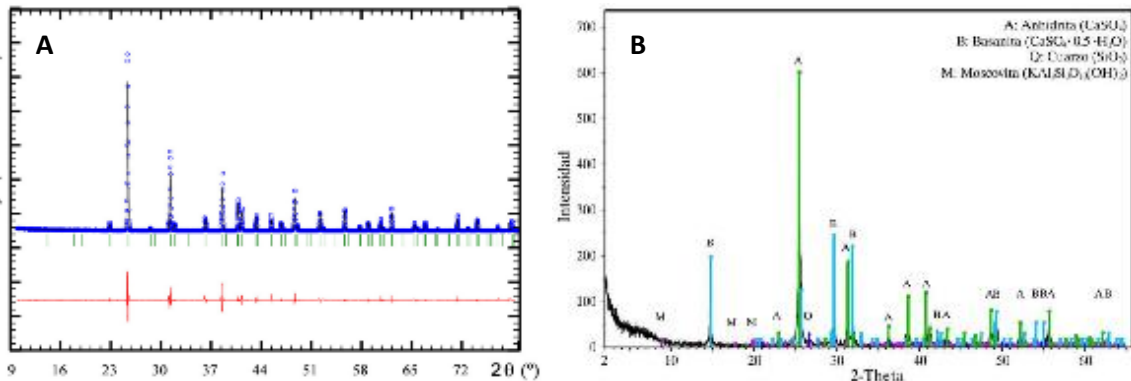


Figura 56. A) DRX de AN con espectros característicos, ubicaciones y proporciones de intensidades similares a este estudio [216]; B) Ubicación de picos de AN donde el autor menciona el material se integra por 67% de AN, 32% de bazanita y 9% de impurezas entre cuarzo y moscovita [25].

Los cristales de basanita son de estructura monoclinica, con celda unitaria de 12.03, 6.92 y 12.67 Å, con las dimensiones más grandes de los elementos que integran al MC, los ángulos $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90.27^\circ$ y $\gamma = 90^\circ$, tiene las características similares a lo reportado por Prieto-Taboada (2015) [216], **Figura 56**. Las celdas unitarias de la calcita son las de menor dimensión, con una

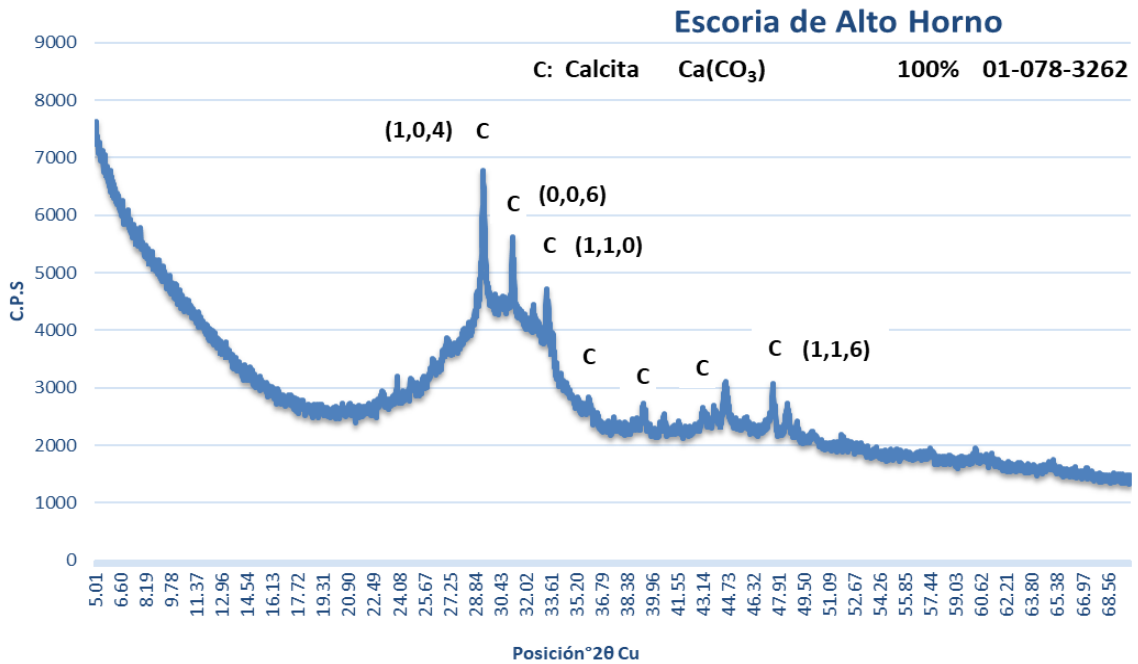
estructura romboedral con parámetros 4.98, 4.98 y 17.06 Å y ángulos 90°,90° y 120 ° por su porcentaje de volumen es considerado como impureza en el material.

Escoria de alto horno.

En el difractograma se muestra un espectro característico del material de forma amorfa, que revela alta reactividad [27], con un espectro continuo y una elevación que comienza desde el ángulo 20.90° hasta el 36.79° (2θ), que presenta algunos picos principales que sugieren contener algunos cristales de Calcita en los ángulos 29.33°, 48.39°, 39.32°, 47.40° (2θ) de mayor a menor intensidad, con planos ubicados en (1,0,4), (1,1,6), (1,1,3) y (0,1,8) respectivamente, **Gráfica 14**.

El carbonato de Calcio es el compuesto único del material, con un 100%, sin encontrarse impurezas en su composición, similar al empleado por *Biskri 2017* [171] y que cumple los requerimientos de composición química, como el no contener sulfuro de Azufre en más del 2.5% según ASTM-C989 [68], **Figura 57**.

Los cristales de calcita Ca (CO₃) están dispuestos en un sistema romboedral, con medidas de celda unitaria a= 5.00, b= 5.00 y c= 7.09, y ángulos α= 90°, β= 90°, γ= 120°, por lo que es considerado como un mineral natural, cerámico con código 01-078-3262 y colección ICSD 164935.



Gráfica 14. DRX EAH.

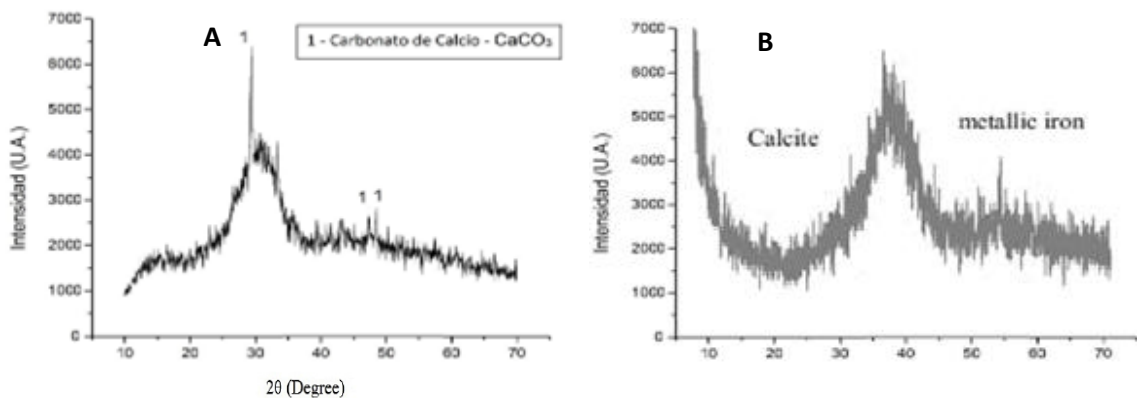


Figura 57. A) DRX EAH muestra similitud a la obtenida en este estudio en forma vítrea, amorfa y cristales de carbonato de calcio que sobresalen en las mismas ubicaciones [27]; B) Espectro con configuraciones similares pero varía en intensidades y se tiene una impureza de hierro [171].

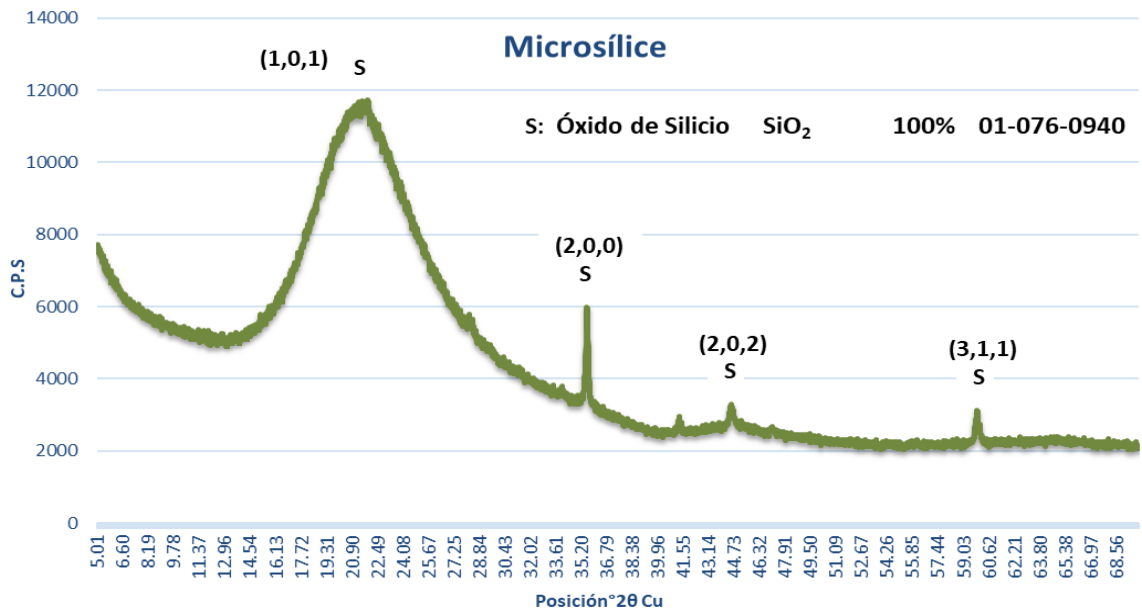
Microsílice.

El difractograma de la MS muestra que se encuentra formada en un 100% por óxido de Silicio (SiO_2) sobrepasando los porcentajes considerados de muy alto contenido del 85 al 96%, por lo que es un material muy puro, cumpliendo los requerimientos de composición química establecidos en la ASTM-C1240 [73].

El espectro continuo del material es similar al obtenido por *García Quiñones 2016* [217] y *Hot 2015* [214], **Figura 58**. Su forma amorfa está definida en el código de identificación 01-076-0940 y referencia ICSD 34932, que lo clasifica como mineral inorgánico, metálico o Inter metálico. Presenta un espectro continuo correspondiente a un patrón de material amorfo, donde se revela un halo con una ubicación en el ángulo 12.96° , extendiéndose hasta 35.20° (2θ) de fase amorfa y algunos picos de intensidades variables, que corresponden a cristales de óxido de Silicio, como el descrito por Hot (2015) y que corresponden a cristales de Cuarzo [217], **Gráfica 15**.

Los espectros característicos de estos cristales se ubican a los 21.81° , 35.91° , 31.12° y 28.25° (2θ), que contienen coordenadas de planos (1,0,1), (2,0,0), (1,0,2) y (1,1,1) respectivamente que, por su proporción en el compuesto, se toman como impurezas del material.

La celda unitaria de la Microsílice es una estructura tetragonal, con parámetro de celda de $a= 4.99$, $b= 4.99$ y $c= 7.01 \text{ \AA}$, con ángulos de $\alpha= 90^\circ$, $\beta= 90^\circ$ y $\gamma= 90^\circ$.



Gráfica 15. DRX MS.

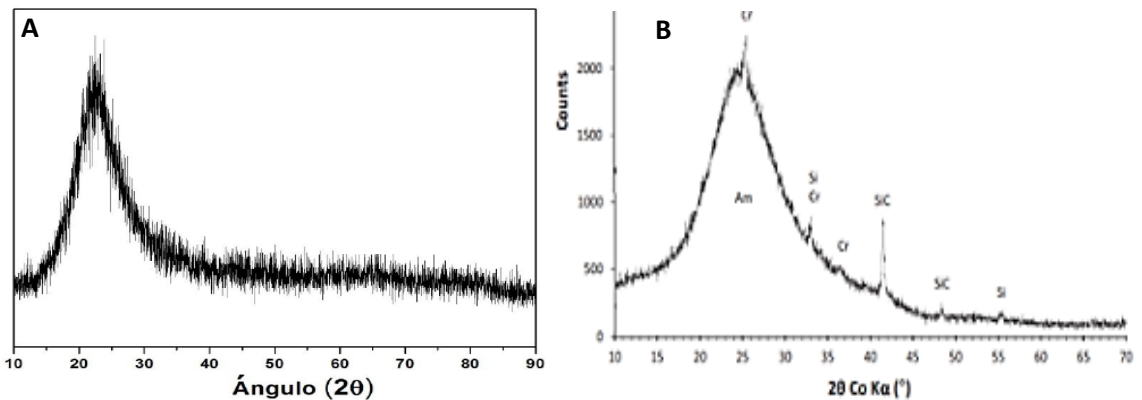


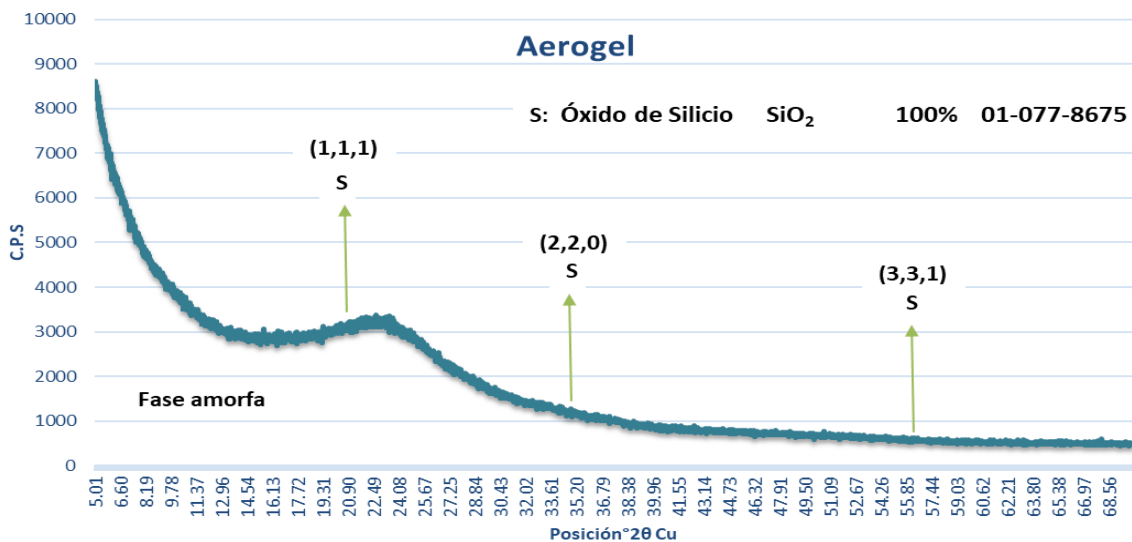
Figura 58. Imágenes de DRX que muestran la similitud de espectro amorfo de la MS con el obtenido en esta investigación, A) Quiñones [217] y B) Hot [214].

Aerogel de Sílice.

La técnica de difracción se utilizó para analizar la estructura amorfa del AS, observándose sólo un pico ancho que muestra la fase amorfa del material, con una ubicación en el intervalo de 20 a 30° (2θ). No se presentan picos estrechos de cristales en todo el espectro continuo, **Gráfica 16**. El nombre común de este tipo de óxido de Silicio es Cristobalita en fase beta. Su configuración se

puede retomar del código 01-077-8675 y la referencia ICSD 162666, que define a este material como mineral metálico o inter metálico, inorgánico, con sistema cristalino cúbico, con parámetros de celda $a=7.14$, $b=7.14$ y $c=7.14$, con ángulos $\alpha= 90^\circ$, $\beta= 90^\circ$ y $\gamma=90^\circ$. Los pocos picos que se presentan no tienen mucha intensidad por lo que no sobresalen del espectro. Estos se ubican en la posición 21.51° , 35.49° y 56.04° . Por las características del difractograma, se puede mencionar que el material no tiene impurezas en su composición.

Los difractogramas de la **Figura 59** muestran la similitud con el obtenido en esta investigación, se presenta el único pico característico de una fase amorfa, en posición e intensidad similar.



Gráfica 16. DRX AS, espectro característico de un material amorfo.

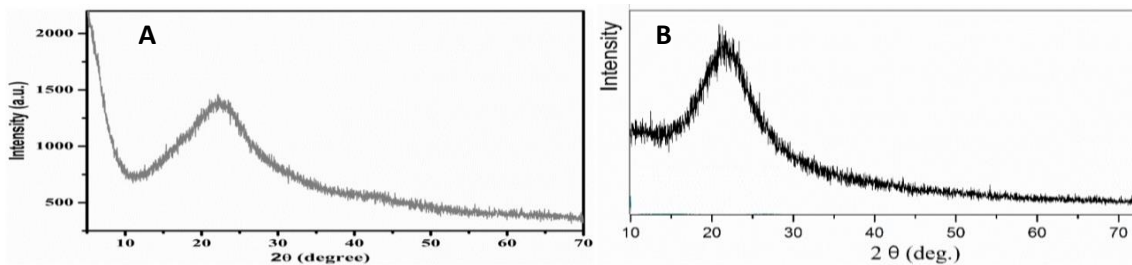


Figura 59. Difractogramas obtenidos por A) Khedkar 2019 [170] y B) He 2018 [215].

4.1.6 Microscopía electrónica de barrido.

Anhidrita

En la **Figura 60 a)**, obtenida a 100 aumentos, se muestra la superficie de la anhidrita con apariencia de material árido, compuesta por gránulos en forma redondeada y algunos de forma angulada, procedentes de un proceso de trituración. Los cristales de sulfato de Calcio se entrelazan formando estructuras algunas veces masivas y otras granular.

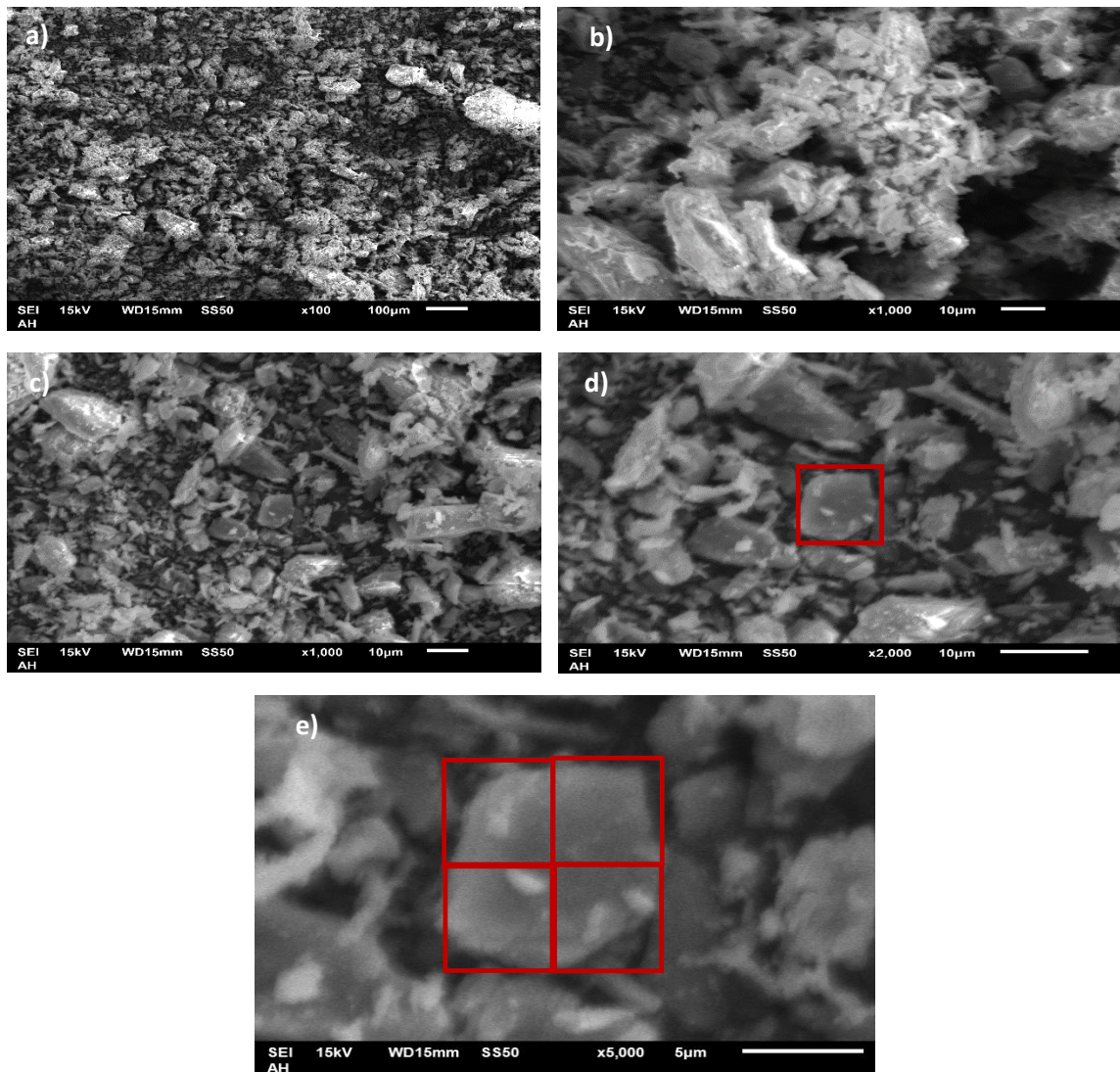
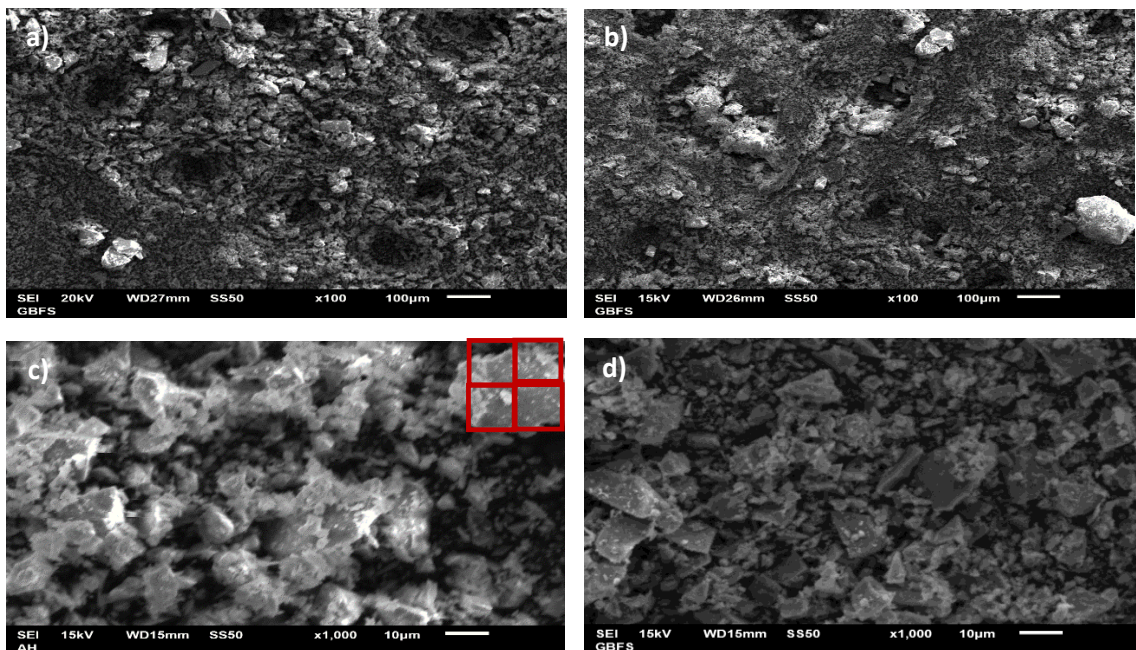


Figura 60. Imágenes que muestran la superficie y partículas de AN.

En **b)**, **c)** y **d)** con 1000 y 2000 aumentos se aprecia el aspecto fibroso y la estructura compacta de la AN, de forma sacaroidea parecida a el azúcar. En la microscopía **d)** se evidencia que el tamaño de los gránulos es en su mayoría uniformes. El 60% del material contiene tamaños de partículas entre 10 y 100 micras. En **e)** se observa un gránulo de 10 micras de diámetro.

Escoria de Alto Horno (EAH)

Como se percibe en la **Figura 61**, la escoria está compuesta por partículas que forman una morfología general de superficie de aspecto áspero, rugoso percibido a los 100 aumentos **a)** y **b)**. En las imágenes tomadas a 1,000 aumentos **c)**, **d)**, **e)** y **f)** se perciben las formas granulares amorfas de conformación irregular, angular, cristalizada que presentan pocos cristales de 100 micras de tamaño, considerando que son alrededor de 5% y un gran porcentaje tiene tamaños de 30 a 100 micras, hasta en un 65%.



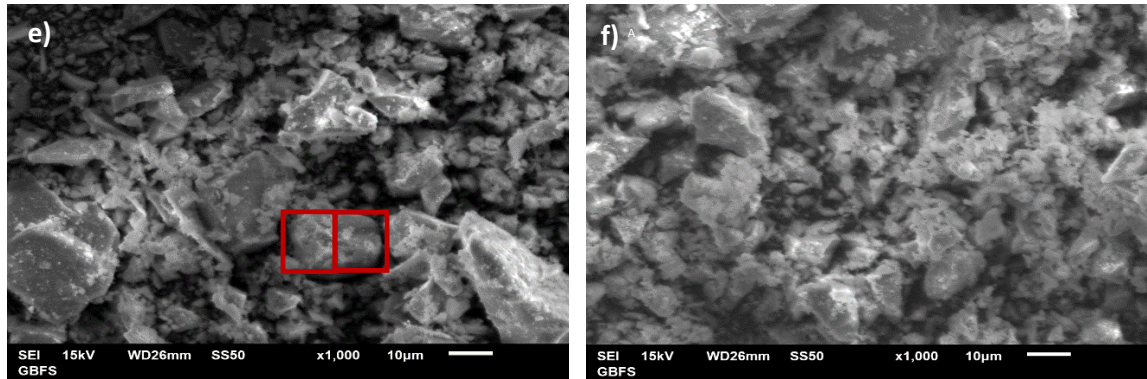


Figura 61. Imágenes (SEM) superficie y gránulos de EAH.

En las imágenes amplificadas a 2000 y 5000 aumentos **g), h) e i)**, es visible la forma irregular de los gránulos, con cortes en forma angular, como cristales, en algunos casos acuñaos y de superficiales planas con relieves poco pronunciados, **Figura 62.**

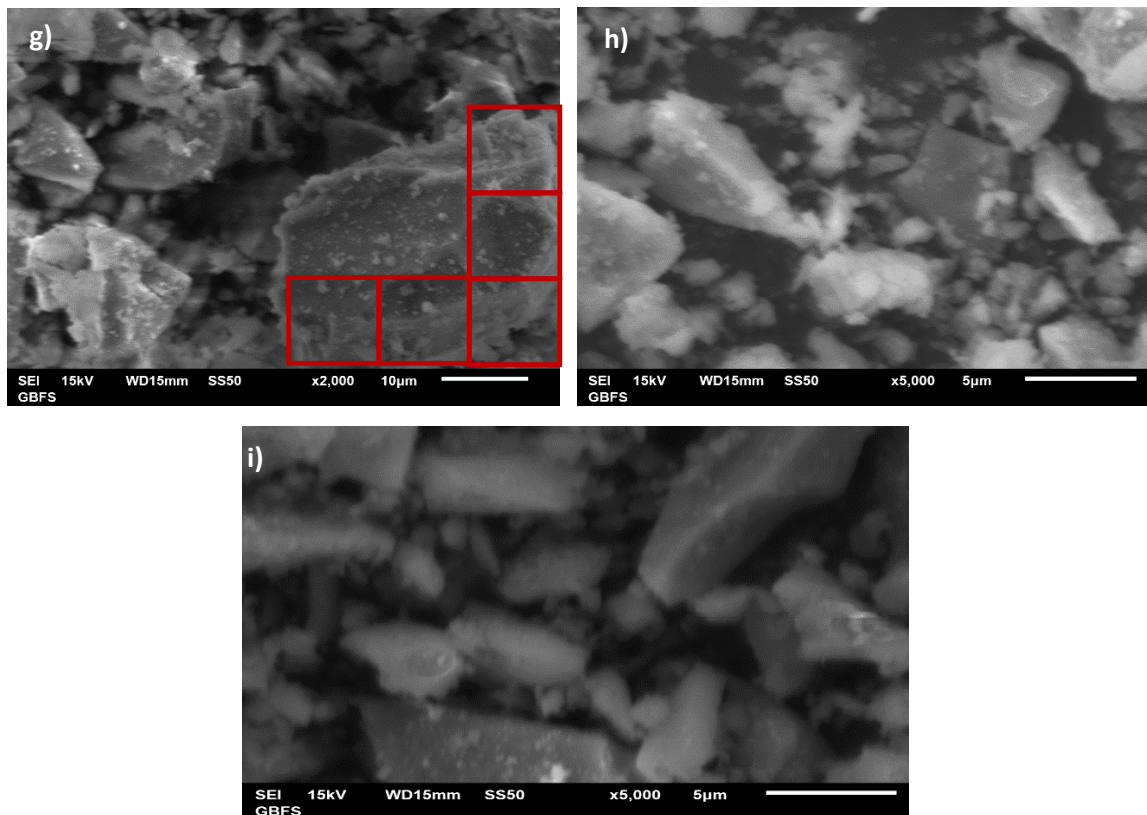
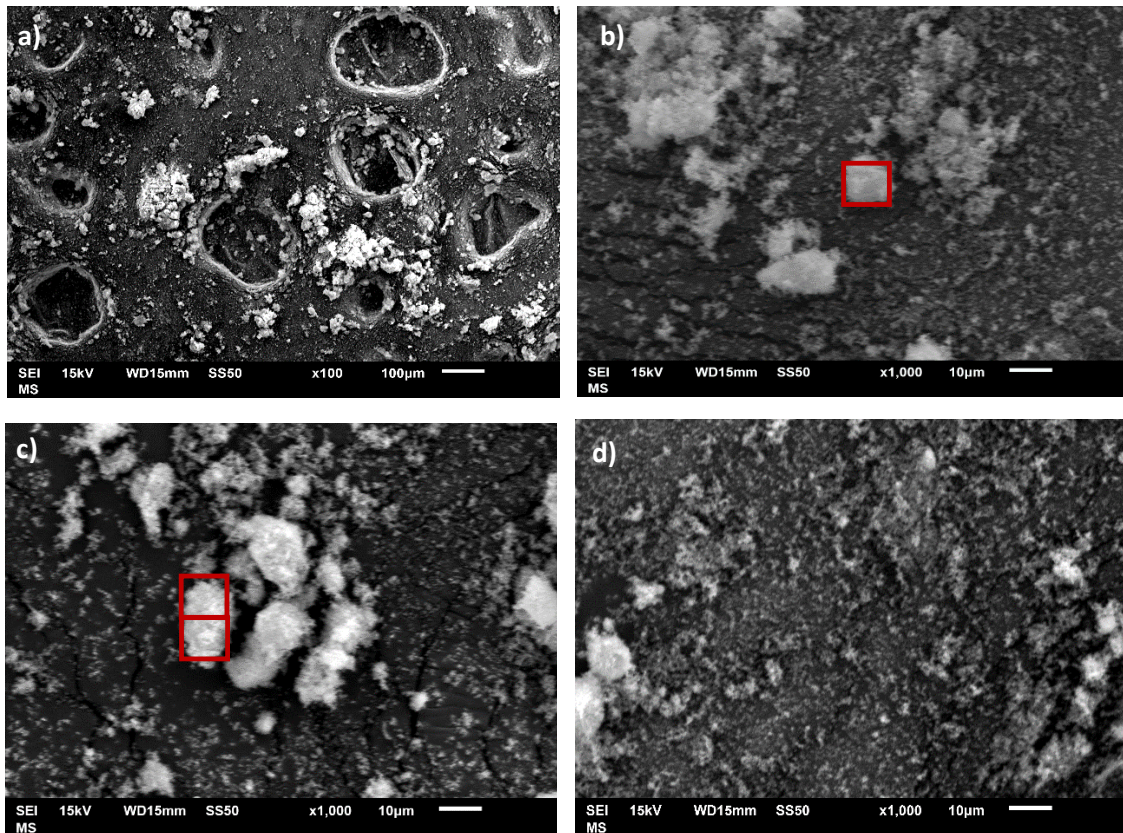


Figura 62. Forma y tamaño de gránulos acristalados de EAH.

Microsílice (MS).

Se perciben en la superficie del material, **Figura 63 a)**, las aglomeraciones naturales que se producen de las partículas amorfas de Microsílice. La mayoría de estos conjuntos se presentan con dimensiones promedio de 10 micras que se distinguen en las imágenes a 1000 aumentos **b), c) y d)**; el tamaño regular de las partículas varía entre 10 a 40 micras, hasta en un 85% de ellas. En las imágenes **e), f), g) y h)**, con 2000 y 5000 aumentos, es visible el tamaño de estas aglomeraciones dejando ver la ultra finura de este material que, al presentar esta característica física, es utilizada como micro relleno.



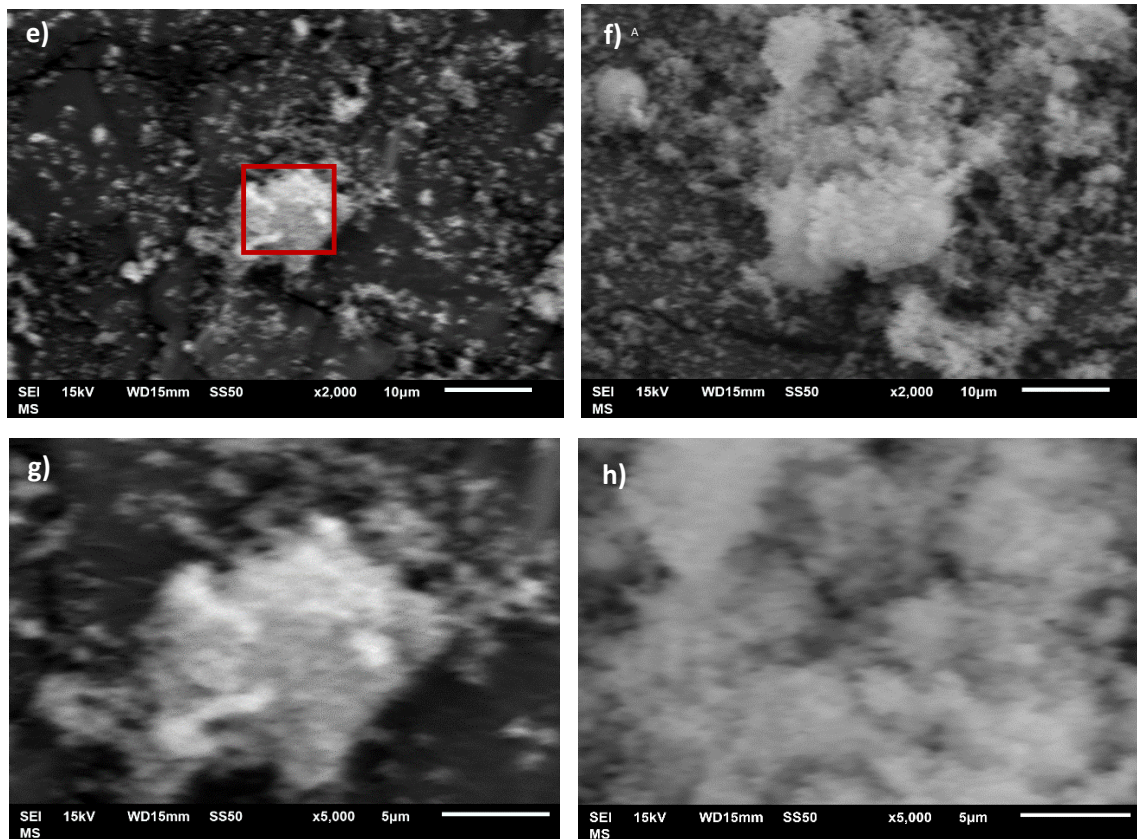


Figura 63. Imágenes (SEM) superficie y conglomeraciones de partículas de MS.

Aerogel de Sílice (AS)

Las microscopías muestran las partículas de AS A1000, que son las de mayor dimensión en este estudio. Se presentan en su morfología principal como cristales de forma irregular en algunas ocasiones alargados, con cortes regulares y ligeramente angulares. Esto sobre todo en las partículas de dimensiones y grosores de 1000 a 1500 micras, que son en menor porcentaje un 3% del total, **Figura 64. a), b), c) y d).**

La morfología cambia en las partículas de dimensiones menores que en promedio miden 100 a 800 micras, con un porcentaje de 83%, con formas no

alargadas, planas, pero con bordes más ondulados, de la misma forma que las más pequeñas de 50 a 100 micras que en promedio suman un 10% del total.

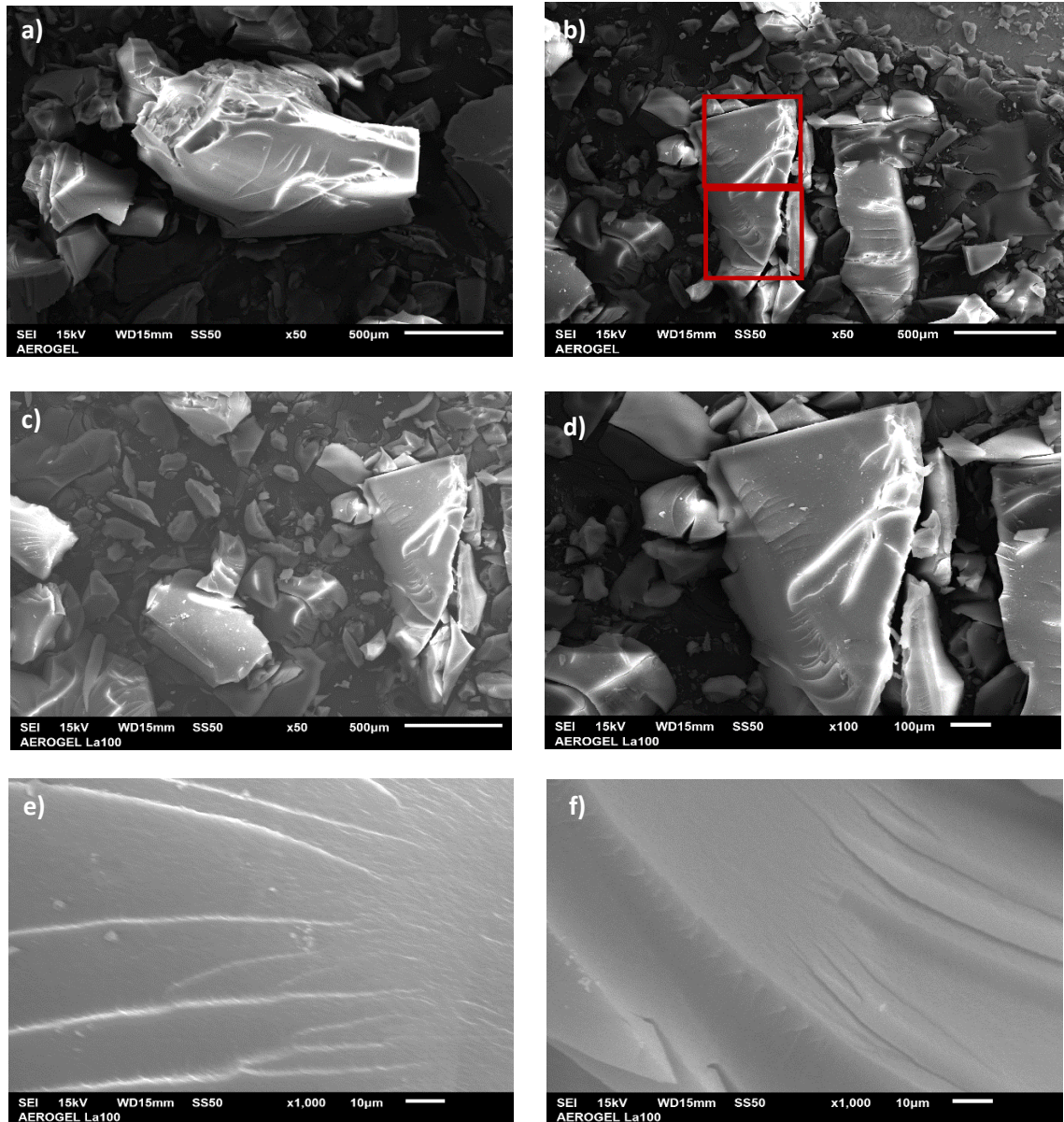


Figura 64. Imágenes SEM de la superficie de las partículas de AS A1000.

Las imágenes del gráfico **Figura 63. e) y f)** amplificadas a 1000 aumentos, muestran la superficie de las partículas del Aerogel, de forma regular, plana, con algunos pliegues como planos superpuestos, con separaciones de 10 a 20

micras. La superficie se percibe compuesta por una textura formada por los poros nanométricos de tamaño regular, ya que no se perciben alteraciones, microporos ni micro fisuras o delaminaciones en su pared.

Etapa II

4.2 Fluidéz de las mezclas.

El parámetro recomendado para morteros, según la norma ASTM- 109, es una fluidéz media plástica de 100 – 120%, por lo que la cantidad de agua deberá ser la necesaria para obtener una fluidéz de 110+/-5%. **Tabla 42.**

Tabla 42. Medición de la fluidéz de la pasta.

Fluidéz	
Dura (seca)	80-110
Media (Plástica)	100-120
Fluida (Húmeda)	120-150
Condición media (Plástica)	110+/-5%

Se experimentó con las proporciones de 0.50, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75 y 0.80, resultando que la proporción de 0.65 de volumen de agua con respecto al volumen de los cementantes y activadores utilizados, tiene las condiciones de fluidéz dentro del intervalo establecido, por lo que esta dosificación se empleó para las mezclas en todas las experimentaciones, **Tabla 43 y 44.**

Tabla 43. Fluidéz calculada por porcentaje de agua y volumen de cementantes 0.50, 0.60 y 0.65.

Medición de fluidéz de pasta con 0.50 / Cem de Agua

Medición	Diámetro	cm	Cálculo de fluidéz	
1	D1	15.6	Fluidéz = (DP - DI/ DI) X 100	
2	D2	15.5		
3	D3	15	DP-DI	5.525
4	D4	16	(DP - DI/ DI)	0.55
Diámetro promedio	DP	15.525	Fluidéz	55.25
Diámetro inicial	DI	10		100

Medición de fluidez de pasta con 0.60 / Cem de Agua

Medición	Diámetro	cm	Cálculo de fluidez	
1	D1	17.5	Fluidez = (DP - DI/ DI) X 100	
2	D2	17.8		
3	D3	17.5	DP-DI	7.525
4	D4	17.3	(DP - DI/ DI)	0.75
				100
Diámetro promedio	DP	17.525	Fluidez	75.25
Diámetro inicial	DI	10		

Medición de fluidez de pasta con 0.65 / Cem de Agua

Medición	Diámetro	cm	Cálculo de fluidez	
1	D1	21.8	Fluidez = (DP - DI/ DI) X 100	
2	D2	21.4		
3	D3	21.5	DP-DI	11.475
4	D4	21.2	(DP - DI/ DI)	1.15
				100
Diámetro promedio	DP	21.475	Fluidez	114.75
Diámetro inicial	DI	10		

Tabla 44. Fluidez calculada por porcentaje de agua y volumen de cementantes 0.70, 0.75 y 0.80.

Medición de fluidez de pasta con 0.70 / Cem de Agua

Medición	Diámetro	cm	Cálculo de fluidez	
1	D1	21.8	Fluidez = (DP - DI/ DI) X 100	
2	D2	22		
3	D3	21.8	DP-DI	11.9
4	D4	22	(DP - DI/ DI)	1.19
				100
Diámetro promedio	DP	21.9	Fluidez	119
Diámetro inicial	DI	10		

Medición de fluidez de pasta con 0.75 / Cem de Agua

Medición	Diámetro	cm	Cálculo de fluidez		
1	D1	22.8	Fluidez = (DP - DI/ DI) X 100		
2	D2	22.4			
3	D3	22.7	DP-DI	12.575	
4	D4	22.4	(DP - DI/ DI)	1.26	100
Diámetro promedio	DP	22.575	Fluidez	125.75	
Diámetro inicial	DI	10			

Medición de fluidez de pasta con 0.80 / Cem de Agua

Medición	Diámetro	cm	Cálculo de fluidez		
1	D1	23.3	Fluidez = (DP - DI/ DI) X 100		
2	D2	23			
3	D3	23.4	DP-DI	13.25	
4	D4	23.3	(DP - DI/ DI)	1.33	100
Diámetro promedio	DP	23.25	Fluidez	132.5	
Diámetro inicial	DI	10			

Etapa III

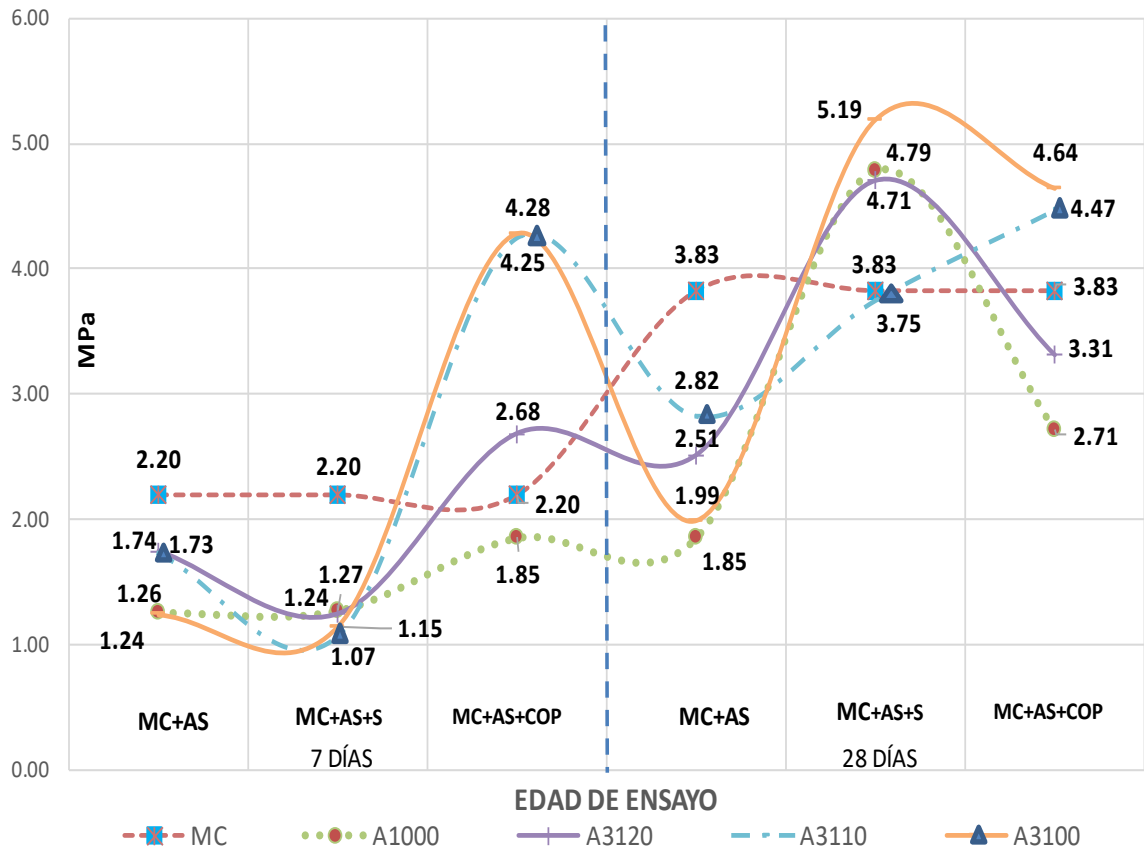
4.3 Estudio de la selección de tamaño de partícula AS y aditivo modificador.

Resistencia a la compresión

La muestra de referencia MC presenta una resistencia a la compresión de 2.2 MPa, a los 7 días, 44% más que las muestras del grupo MC+AS. Esto se atribuye al problema de baja compatibilidad del AS que reduce la resistencia del compuesto. Las muestras del grupo MC+AS+S presentan las resistencias más bajas, en algunos casos hasta menores de las que sólo contienen AS y hasta un 52% menos que la MC. Esto se atribuye a que el aditivo S no reacciona a edades tempranas, **Gráfica 17**.

Las muestras del grupo MC+AS+COP a esta misma edad sobrepasan la resistencia de la MC, hasta en un 49%, notando mayor beneficio en tres de los especímenes de menor tamaño A3120, A3110 y A3100. Este último alcanza una resistencia de 4.28 MPa, lo que advierte que el COP contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas de los compuestos, **Gráfica 17**.

A la edad de 28 días, los resultados muestran la misma tendencia en los especímenes MC+AS, presentando los menores esfuerzos de compresión. En este grupo el tamaño de partícula A1000 alcanza una resistencia del 52% menos que la MC. Los grupos MC+AS+S y MC+AS+COP demuestran que ambos aditivos incrementaron la propiedad mecánica sobrepasando los resultados de la MC, además que en ambos grupos el tamaño de partícula de menor dimensión A3100 alcanza resistencias de 5.19 y 4.64 MPa, un 26 y 28% más, en comparación con la MC, **Gráfica 17**.



Gráfica 17. Esfuerzos de compresión de muestras ensayadas a 7 y 28 días.

Se demuestra que el aditivo COP es el que presenta 5 de los mejores comportamientos, evidenciando que proporciona un mayor beneficio a los compuestos con AS, incrementando su resistencia a la compresión, que sugiere una modificación y tratamiento superficial más eficaz, en comparación con el aditivo S. En lo que respecta al tamaño de partícula, se comprueba que se alcanzan mejores comportamientos mecánicos con las partículas de menor dimensión y que, en conjunto con el aditivo, incrementan las resistencias de los compuestos.

El tamaño A3100 obtiene las mejores resistencias tanto en el grupo MC+AS+S, como en el MC+AS+COP. Por lo tanto, es el tamaño de partícula que se siguió estudiando posteriormente.

Propiedades térmicas.

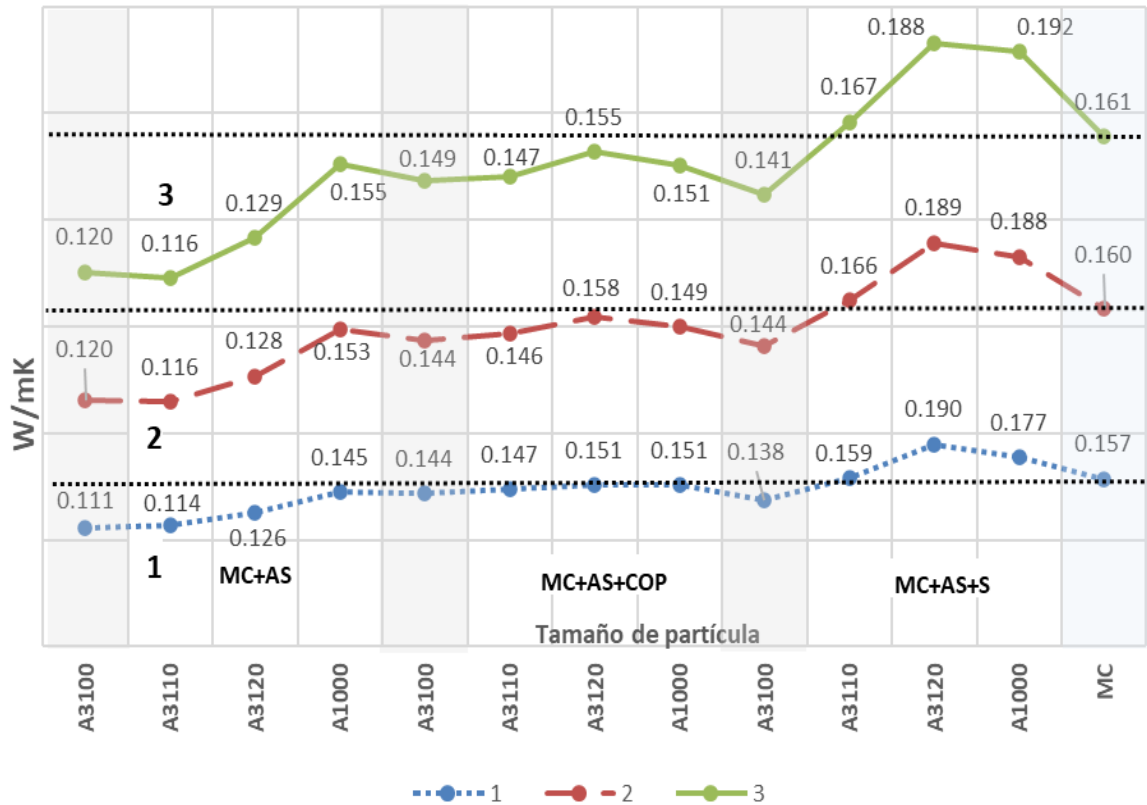
Dentro del estudio de conductividad térmica se percibe que los compuestos que contienen agregado de aerogel A3100 y A3110, de tamaños de partículas menores, son los que presentan las mejores propiedades de conductividad térmica, debido a la dispersión y distribución que se logra con estas partículas, en comparación con las muestras que contienen tamaños mayores. Las mediciones van desde 0.111 (A3100) a 0.1203 W/mK (A3110) y un promedio de 0.1170 y 0.1151 W/mK, respectivamente, siendo las más bajas conductividades conseguidas.

En la **Gráfica 18**, la tendencia es que, al incrementarse el tamaño de la partícula, la conductividad térmica también se incrementa, hasta un 23% más en el caso de las partículas A1000 y 25% en A3120S, con lecturas de 0.1445 W/mK (A1000) a 0.1896 W/mK (A3120S), siendo estas las de mayor conductividad térmica.

El empleo de los aditivos surfactantes para la modificación superficial provoca la disminución de la resistencia térmica de la pasta con respecto a las muestras compuestas solo con el agregado AS, presentan un 28% (A3110) y 27% (A3100), por debajo a la MC+SA, lo que permite reconocer que este agregado mejora las propiedades de aislamiento térmico en las pastas; las muestras con el surfactante copolímero presenta disminución de resistencias, pero todas más arriba que la MC un 9% (A3100COP), **Gráfica 19**.

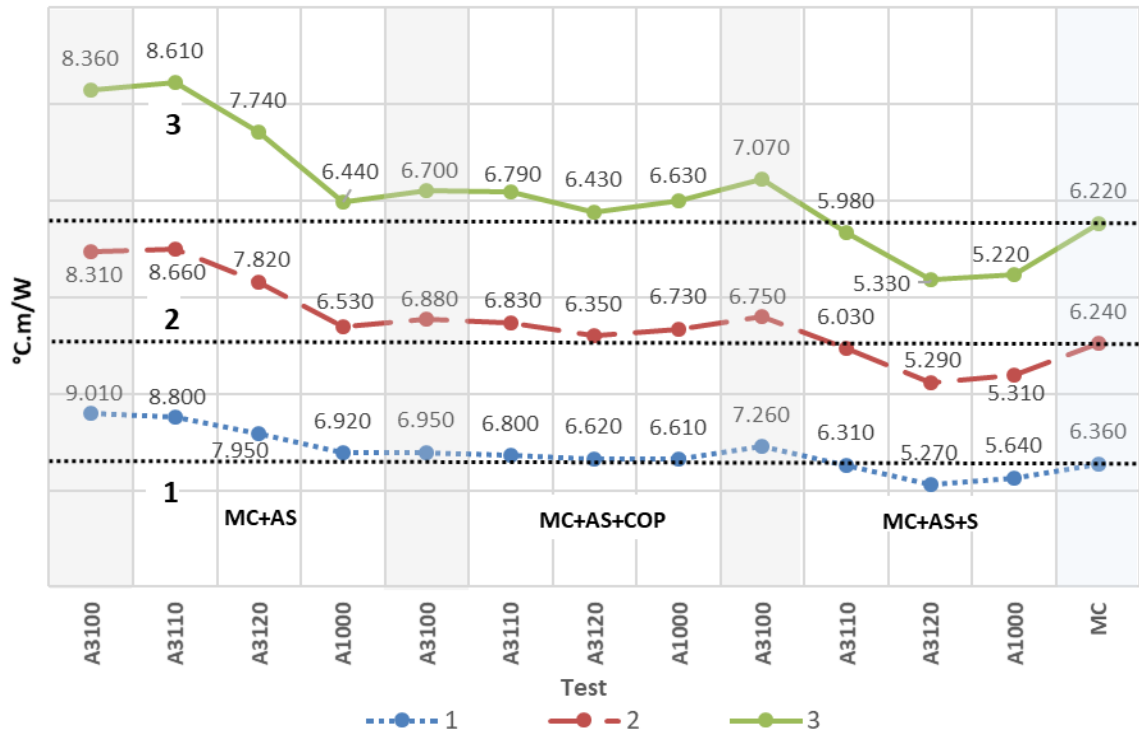
Las muestras con surfactante Silano son las que presentan menores propiedades térmicas con resistencias en tres de ellas más bajas que la de la

muestra de referencia MC hasta en un 16%, por lo tanto, se advierte que el Silano no ayuda a conseguir un material más aislante, **Gráfica 19**.

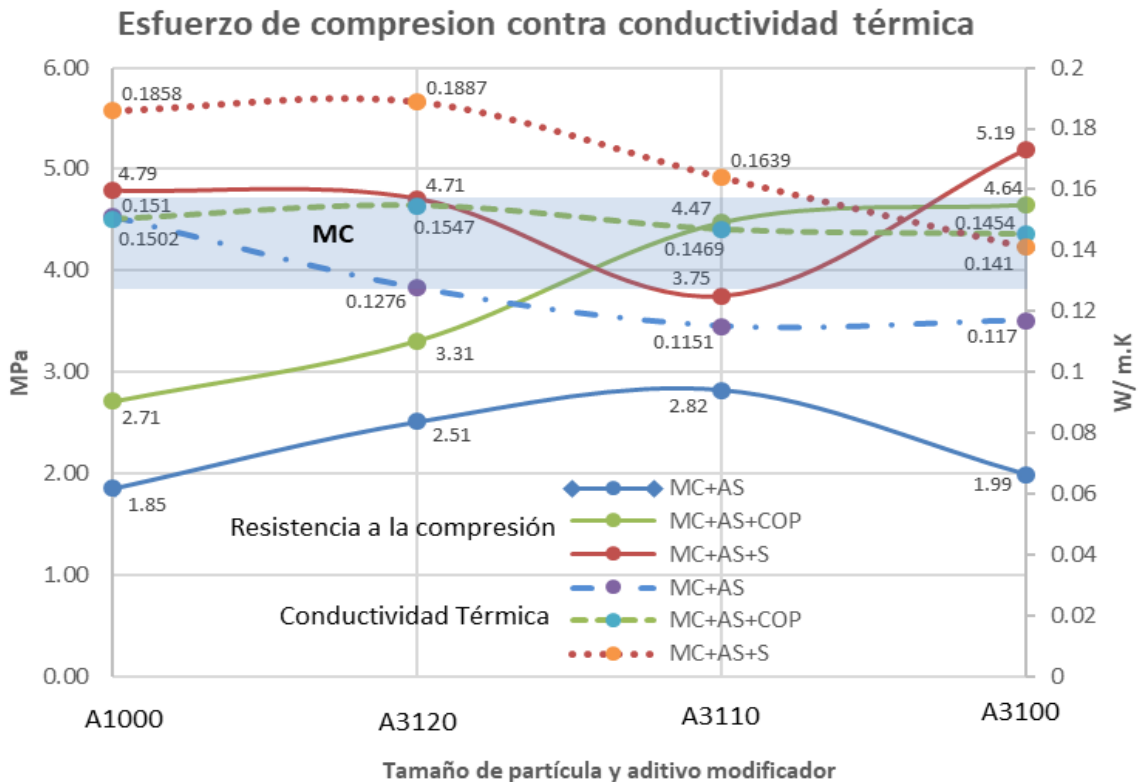


Gráfica 18. Medición de conductividad térmica de pastas AH+EAH+MS con agregados de AS con diferentes tamaños de partículas, aditivos Copolímero y Silano.

Este estudio permite observar que la pasta del MC (AN+EAH+MS), presenta baja conductividad térmica 0.1595 W/mK, con respecto a la muestra de yeso tomada para la calibración del equipo de 0.3033 W/mK, además de comprobar la mejora de las propiedades térmicas con el AS, se determina que los tamaños de partículas de aerogel menores ayudan a conseguir mejores propiedades y que el copolímero como medio de modificación superficial es la mejor opción, más que el Silano, en cuanto a la conductividad y la resistencia térmica, **Gráfica 20**.



Gráfica 19. Medición de resistencia térmica a muestras con AS, AS con Copolímero (AS+COP) y AS con Silano (AS+S) como surfactantes.



Gráfica 20. Comportamiento térmico y resistencia mecánica a la compresión a los 28 días de fraguado de pastas con partículas de AS modificado.

SEM y EDS.

Por medio de imágenes EDS y la composición del AS se identificaron las partículas A3110 que tienen forma triangular, con cortes rectos, textura lisa, el cristal de mayor dimensión aproximadamente mide 20 μm y algo importante es que presentan una dispersión adecuada en la pasta, **Figura 65 a) y b)**. En la **Figura 65 c)** se identificó que la partícula de AS sin tratamiento superficial genera algunos problemas de compatibilización en la parte superior y derecha, dejando ver separaciones en la zona de interfase entre los materiales.

En la **Figura 66**, se observó que la pasta elaborada con agregado A3100 y el 2% de aditivo Copolímero, presenta una matriz con poca porosidad y en algunas zonas con presencia de cristales de morfología acicular (en forma de agujas), de mayor longitud que ancho como tubos de 5 X 5 X 10 μm , fenómeno atribuido al uso de aditivo COP, que le brinda una forma densa que le permite alcanzar mejores resistencias.

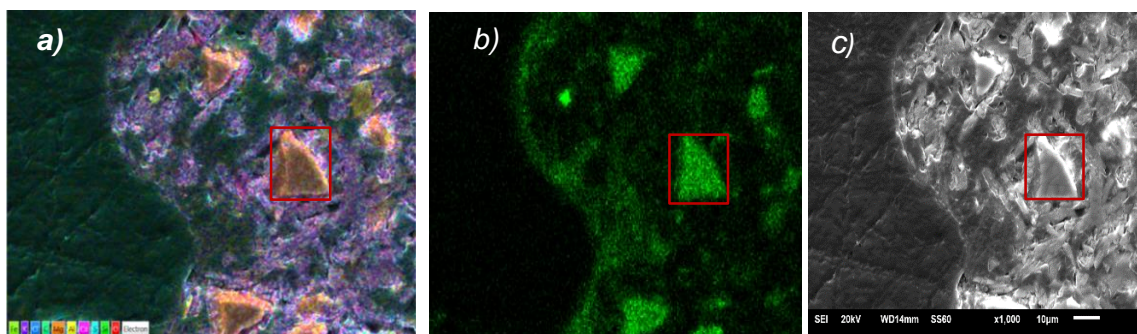


Figura 65. Imágenes EDS y SEM del MC con AS sin modificación superficial; a) Cristales de AS A3110 en superficie de pasta, imagen obtenida a los 1000 aumentos; b) Dispersión del agregado AS en pasta y c) Problemas de unión entre partícula A3110 sin modificación superficial en zona de unión entre materiales, imagen a 4000 aumentos.

Las partículas A3100 de menor dimensión se identifican con formas y líneas redondeadas y los gránulos más grandes son aproximadamente de 10 μm .

No se perciben aglomeraciones en las pastas, por lo que el proceso de homogenizado propuesto en esta investigación fue el adecuado para obtener una buena dispersión en el compuesto, Figura 67 a) y b). En la imagen c) se aprecia una partícula de AS incrustada sobre la superficie del MC. Es un gránulo A3100 aproximadamente de 10 μm a 4,000 aumentos.

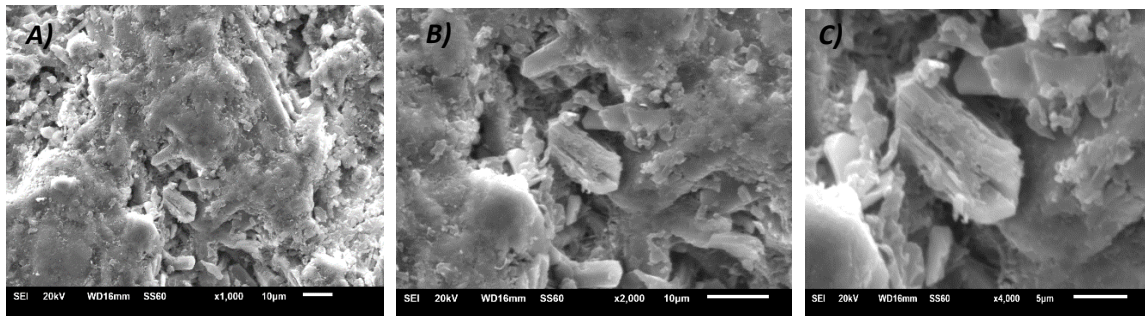


Figura 66. Imágenes SEM del MC con AS modificado; a) Forma densa de la pasta a 1000 aumentos, b) Superficie de pasta con poca porosidad a los 2000 aumentos y c) Formación de cristales atribuidas al uso del aditivo COP imagen a 4000 aumentos.

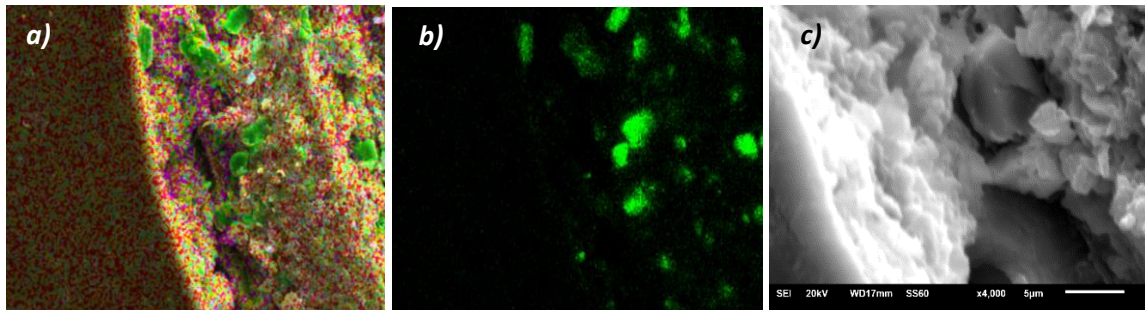


Figura 67. EDS y SEM del MC con AS 3100 modificado; a) Identificación del AS a través de su composición química, b) Dispersión de partículas en MC y c) Partículas A3100 en superficie del MC.

En cuanto a la conglomeración de los materiales, se observa que el AS provoca algunos agrietamientos alrededor de la partícula es relacionada con la baja resistencia mecánica que alcanza, **Figura 68 a)**. En las imágenes SEM del conglomerado con aditivo S se percibe que provoca cavidades, macroporos y separaciones de dimensiones aproximadas a 5 μm , formando conductos donde

se transfiere el calor. Como consecuencia, las muestras con este aditivo registran una conductividad térmica mayor, *Figura 68 b*). Por último, las muestras con aditivo COP presentan una conglomeración de materiales más homogénea, densa, sin cavidades ni fisuras y de mayor masividad, por lo que alcanzan mejores resistencias y transmiten menos el calor, *Figura 68 c*).

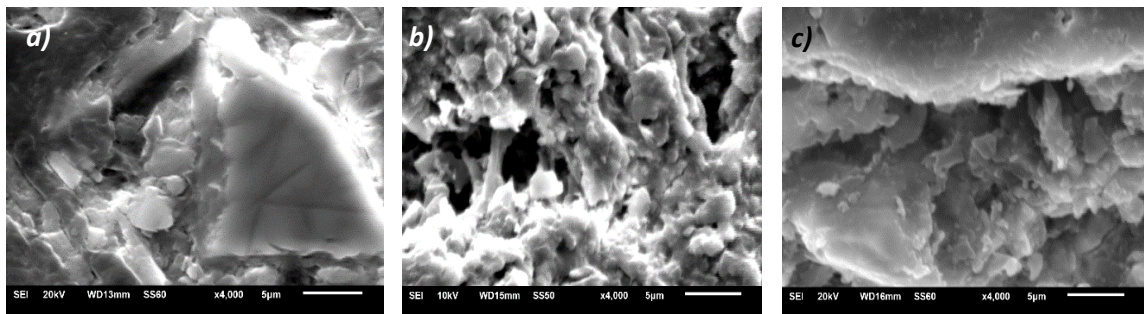


Figura 68. Imágenes SEM, a) Superficie de pastas con agregado AS, b) Conglomerado obtenido con aditivo S; c) Pasta elaborada con aditivo COP en una superficie más homogénea y densa.

La superficie del MC es homogénea, lisa, sin alteraciones profundas, compuesta con un mayor porcentaje de Carbono, en comparación con las muestras elaboradas con aditivo S y COP, donde es menor su contenido, *Figura 69 a*).

En la pasta elaborada con S se aprecian cavidades profundas y porosidades que dividen la superficie. En su composición se aumenta el porcentaje de Silicio, por el agregado AS y la misma composición del aditivo, *Figura 69 b*).

En la pasta con COP se incrementa el contenido de Calcio y Silicio. Se aprecian en la superficie algunas cavidades que provocan porosidad, pero en menor proporción y de menor profundidad que las elaboradas con S, por lo que son las de mejor comportamiento térmico, *Figura 69 c*).

El aditivo COP provocó mejores comportamientos de resistencia a la compresión, obteniendo un curado químico interno en la mezcla, reteniendo y almacenando agua interna, para mantener una saturación de humedad, una hidratación continua que reduce tensiones, porosidades y contracciones; por lo tanto, es el aditivo que se tomó para realizar las siguientes experimentaciones.

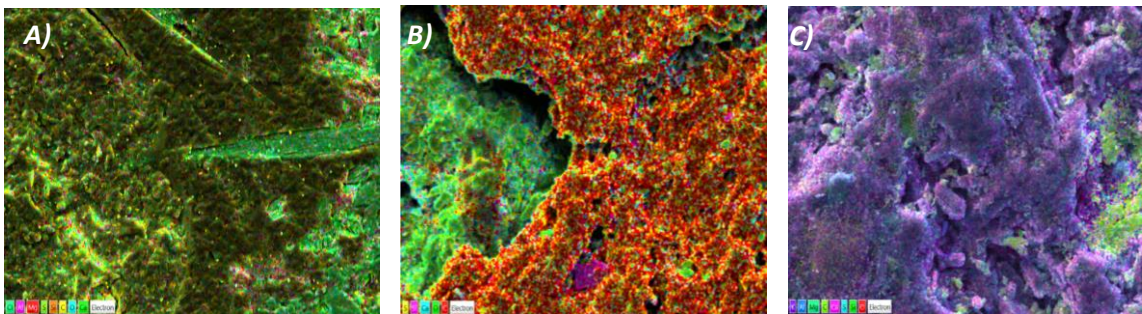


Figura 69. EDS, A) Composición e imagen de MC, B) Conglomerado obtenido con aditivo S; C) Superficie de pasta A3100 y aditivo COP.

Etapa IV

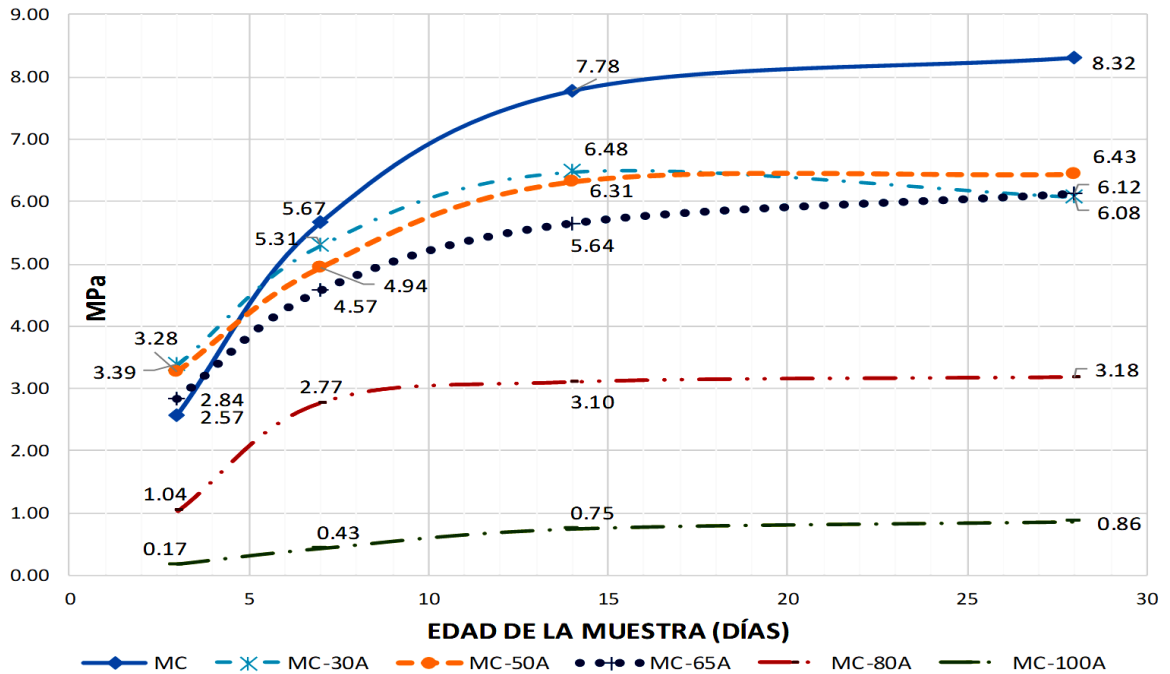
4.4 Estudio de proporción del agregado AS.

Resistencia a la compresión

La muestra MC sin AS es la que presenta mejores comportamientos mecánicos. Las proporciones MC-30A, MC-50A y MC-65A de un 37 a 33% menos que la MC, mientras que la MC-80A y MC-100A con mayor contenido de AS, presentaron las resistencias más bajas, 3.18 y 0.86 MPa respectivamente. La última apenas el 10% de lo alcanzado por MC, **Gráfica 21**.

Se comprueba que el AS baja la resistencia del MC, que las proporciones más eficientes mecánicamente y que se acercan a la resistencia del MC son las de menor agregado de AS, mientras que las de mayor contenido alcanzan

resistencias bajas, y en el caso de la MC-100A, por debajo de lo recomendado para morteros.

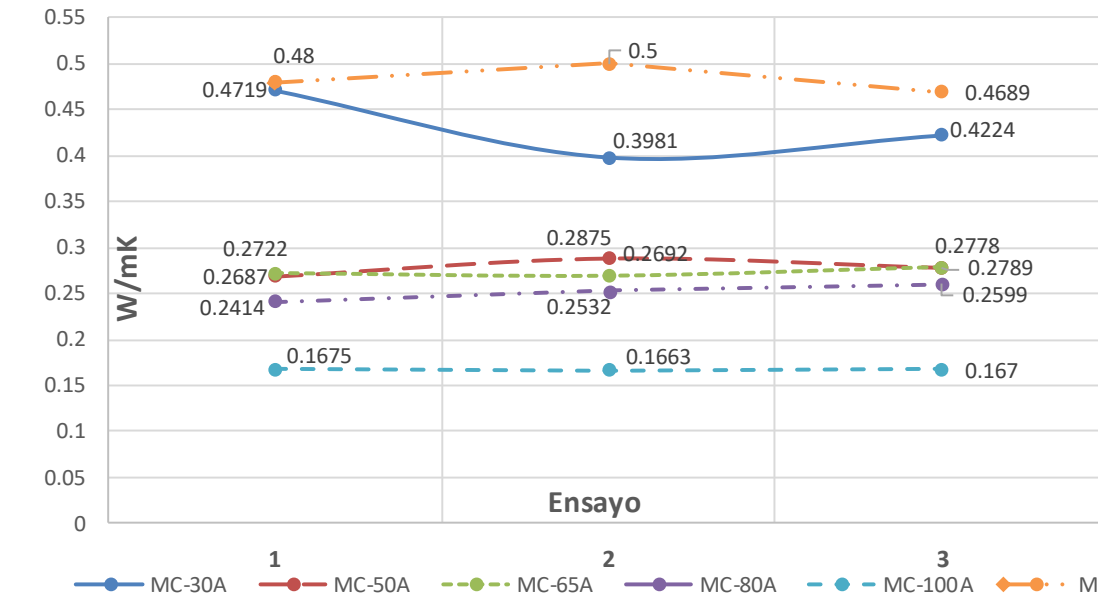


Gráfica 21. Resistencia mecánica a la compresión de morteros con diferentes proporciones de AS modificado.

Propiedades térmicas.

Con el análisis de propiedades térmicas se demostró que la conductividad en las muestras elaboradas con el 30% de AS, son hasta un 43% más conductoras que las elaboradas con el 50 y el 65%, y que estas dos últimas proporciones, presentan propiedades muy similares, resaltando en el segundo ensayo la muestra con 65% de AS, que mostró la menor conductividad térmica de 0.269 W/mK, **Gráfica 22.**

Las muestras con un 80% de agregado AS, obtuvieron, en promedio, una conductividad de 0.251 W/mK y las compuestas con el 100% son las que tienen la propiedad de conducir menor calor, alcanzando 0.166 W/mK, correspondiente a un 33% menos que la que contiene 80%, **Gráfica 22.**



Gráfica 22. Conductividad térmica de morteros con diferentes proporciones de AS modificado.

Según los resultados obtenidos, las muestras de **pasta** elaboradas con un 25% de AS A3100 de partículas menores examinadas en el estudio anterior (selección de tamaño de partícula AS y aditivo modificador), exhiben una menor conductividad térmica de 0.111 W/mK, mientras que las muestras de **mortero** con un 30% de AS A3100 registran 0.398 W/mK. Esto comprueba que la arena contribuye a elevar la conductividad en el compuesto hasta en un 29%, pero beneficia la resistencia mecánica, aumentándola hasta dos veces más, **Tabla 45**.

Tabla 45. Relación de resistencia y conductividad de pastas y morteros.

	Muestra	Compuesto	Agregado AS	Tamaño de partícula	Aditivo Copolímero	Edad de ensayo	Resistencia a compresión	Conductividad térmica
Pasta	MC	MC	-	-	-	28	3.83	0.157
	MC+25A3100	MC	25%	A3100	-	28	1.99	0.111
	MC+25A3100-2COP	MC	25%	A3100	2%	28	4.64	0.138
Mortero	MC	MC	-	-	-	28	8.32	0.468
	MC+30A3100	MC	30%	A3100	-	28	6.12	0.398
	MC+80A3100	MC	80%	A3100	-	28	3.18	0.241

Estudio mineralógico.

Los estudios DRX con muestras a los 28 días de hidratación, permitieron reconocer los minerales de mayor concentración, como el óxido de Silicio en forma de cristales de cuarzo, con un patrón de difracción característico ubicado en $26.62^{\circ}2\theta$, siendo el de mayor intensidad, alcanzando hasta las 55000 y 45000 cps (cuentas por segundo) en MC y MC-50A. **Gráfica 23.**

Su segundo pico más intenso de 21% se presenta en MC-65A, que se localiza a los $20.84^{\circ}2\theta$, con una celda hexagonal de parámetros 4.91, 4.91 y 5.40Å en sus tres planos y ángulos de 90, 90 y 120° respectivamente, con patrones de celda muy similares a la presentada por la MC, **Gráfica 23.**

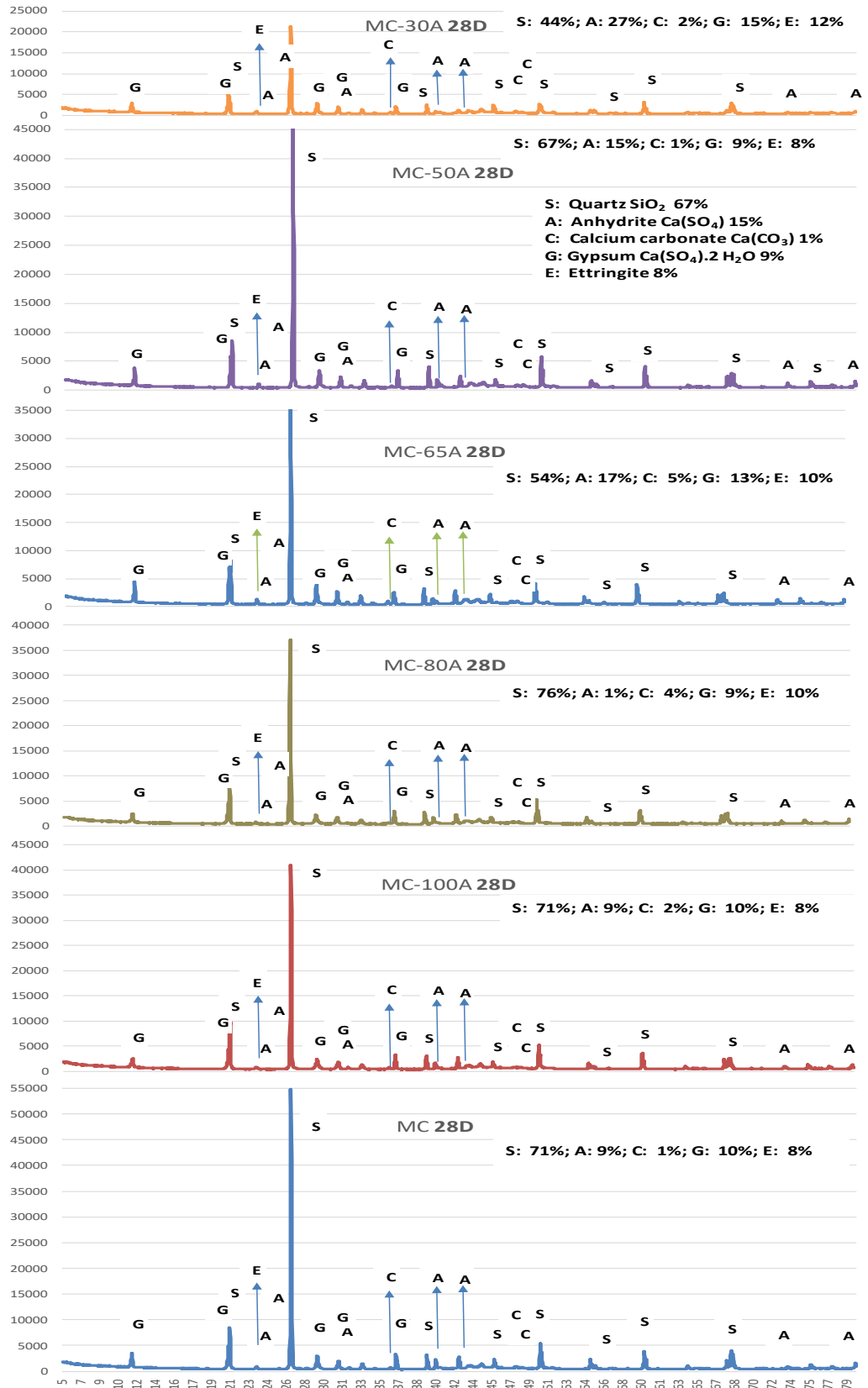
El contenido del mineral SiO_2 varía, ya que está relacionado con la proporción del agregado AS y arena sílica (SS) en el compuesto. La muestra MC-30A se encuentra integrada por el 44% de este material, la MC-50A y MC-65A, formada con el 67 y el 54%; por lo tanto, los porcentajes de menor contenido en muestras lograron una resistencia mayor, comparadas con la MC-80A y MC-100A que están formadas por el 76 y el 71% y que resultaron con propiedades mecánicas menores, **Gráfica 24.**

Otro mineral principal es la AN, que presenta picos sobresalientes en 25.42, 31.35 y $40.80^{\circ}2\theta$, con celdas unitarias ortorrómbicas de distancia inter planar hasta de 4.65Å , con las dimensiones de parámetros de celda más grandes que todos los minerales utilizados en este estudio, con $a=7.00$, $b=6.99$ y $c=6.24\text{Å}$, con ángulos de 90, 90 y 90° , **Gráfica 23.**

En las muestras estudiadas la AN se presenta en mayor porcentaje dentro de la muestra MC-30A con un 27%, porcentaje que se reduce a 15 y 17% en las muestras MC-50A y MC-65A siendo éstas las que obtuvieron una mejor resistencia mecánica. Su menor porcentaje se presenta en la MC-100A y MC-80A con un 9 y 1%, **Gráfica 24**.

El sulfato de Calcio hidratado como yeso (G), de fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, presenta halos de mayor intensidad, ubicados en 20.72 , 29.15 y $31.08^\circ 2\theta$, alcanzado 9000 cps, **Gráfica 23**. Presentan celdas monoclinicas a partir de los tres planos (hkl) y parámetros de $a=5.8$, $b=15.18$ y $c=6.52 \text{ \AA}$, con ángulos de $\alpha=90$, $\beta=118.38$ y $\gamma=90^\circ$.

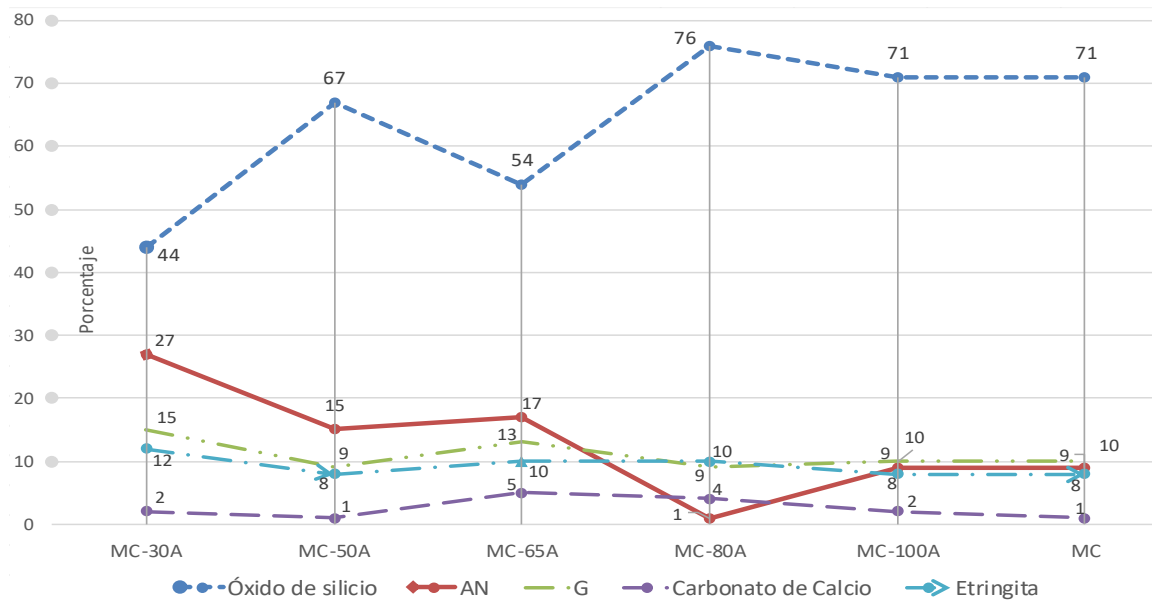
El porcentaje mayor de este mineral se encuentra en MC-30A y MC-65A con 15 y 13% respectivamente, mientras que en MC-80A, MC-100A y MC con porcentajes del 10 y 9%, **Gráfica 24**.



Gráfica 23. DRX Fases mineralógicas de morteros con diferentes proporciones de AS a los 28 días.

Los minerales como el carbonato de Calcio y la etringita, se presentan en menores cantidades en las muestras, en porcentajes que van desde el 10 hasta el 1%, por lo tanto, sus presentaciones son de poca intensidad y son opacados por las fases de minerales más abundantes, **Gráfica 23 y 24.**

Con este estudio se determina que no se continuarán estudiando las muestras MC-100A y la MC-30A. En el primer caso, la proporción no reaccionó adecuadamente para conseguir la resistencia recomendada en las normativas para un mortero y en el segundo caso porque la conductividad térmica que presentó, es la proporción que más conduce el calor y de menor resistencia térmica.



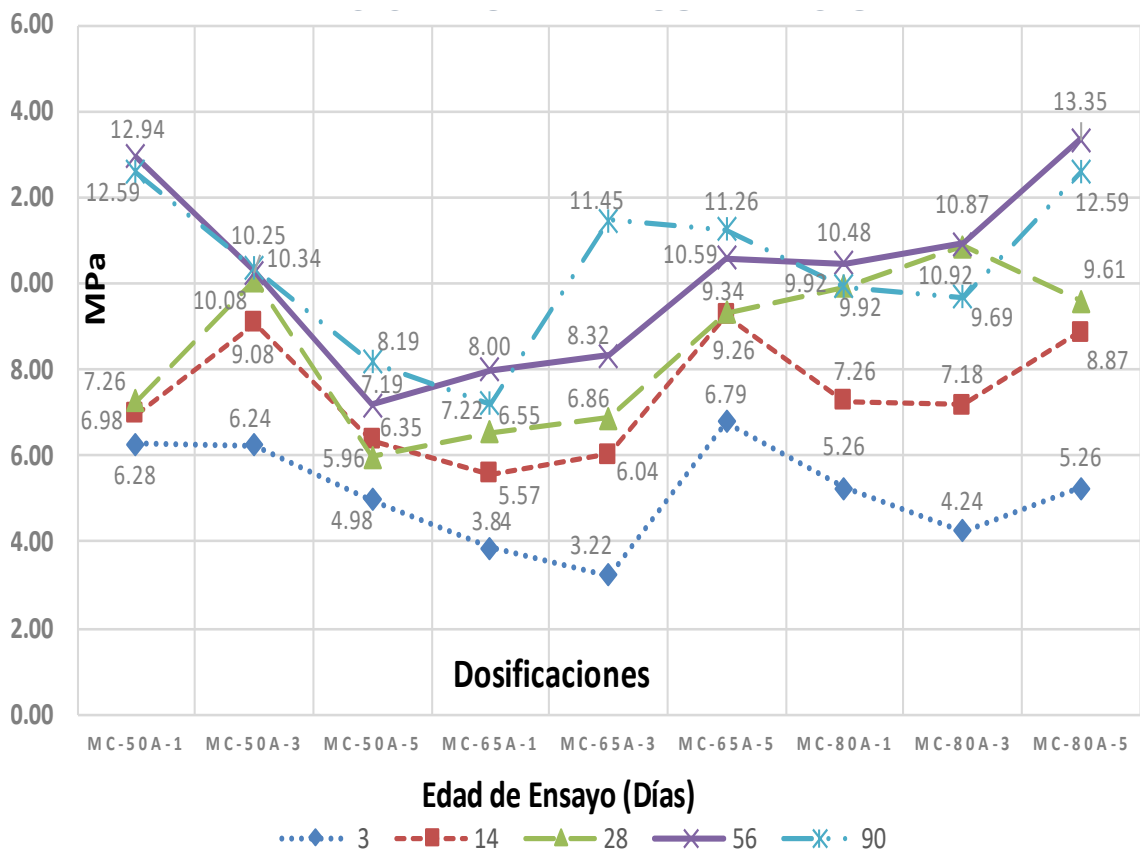
Gráfica 24. Fases mineralógicas en muestras con diferentes contenidos AS.

4.5 Estudio para dosificación de aditivo modificador COP.

Resistencia a la compresión

Los resultados advierten cómo la muestra con contenido de 80% de AS y 5% de aditivo, es la que presenta la mejor resistencia a la compresión con 12.59 y 13.35 MPa a los 56 y 90 días respectivamente. Esta tendencia se puede observar también entre las proporciones de 65% de AS, donde la que contiene el 5% de COP es la de mejor condición comparadas con la MC-65-1 y MC-65-3,

Gráfica 25.



Gráfica 25. Resultados estudio de resistencia a la compresión para determinación de dosificación de aditivo copolímero.

Los resultados muestran cómo los especímenes A50-1, A65-3 y A65-5, presentan casi las mismas resistencias con 12.94, 11.45 y 11.26 MPa a los 90 días, con un 3, 14 y 16% menos que la A80-5. Los comportamientos de las muestras A65-1 y A50-5, son las menos resistentes teniendo resultados de 39 y a 40% por debajo de la A80-5. Cabe señalar que todas las dosificaciones cumplen los requerimientos de resistencia señalados en ASTM-270 para morteros de yeso, **Gráfica 25**.

Propiedades térmicas.

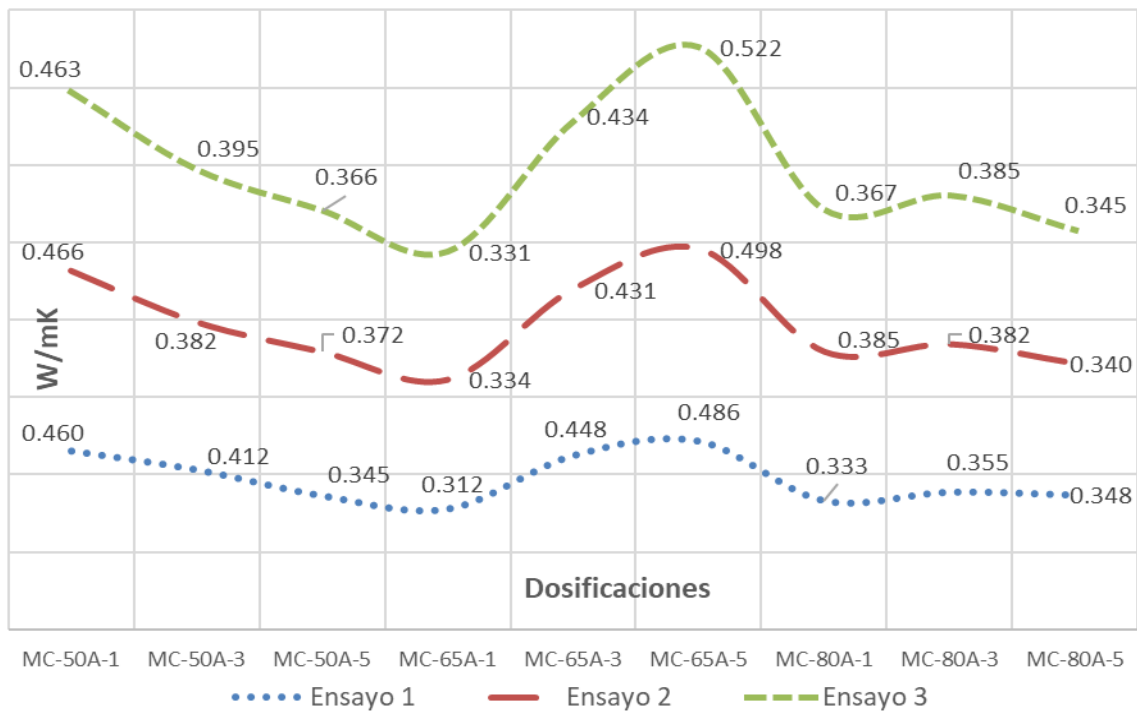
Los tres ensayos de conductividad térmica mostraron la misma tendencia. Se observa que dentro de las muestras A50, la que presentó menor conductividad es la que contiene 5% de adición de aditivo, condición que se repite en las muestras de A80 con la misma dosificación, consiguiendo hasta 0.34 W/mK. Una de las muestras con mejor propiedad térmica es la A65-1, presentando hasta 0.312 W/mK, un 33% y 40% menos que las que presentan mayor conductividad térmica A50-1 y 65-5 respectivamente, **Gráfica 26**.

Con este estudio se puede determinar que la muestra A80-5 obtuvo la mejor resistencia mecánica y menor conductividad térmica convirtiéndose en la mejor opción de mortero.

Componentes químicos elementales.

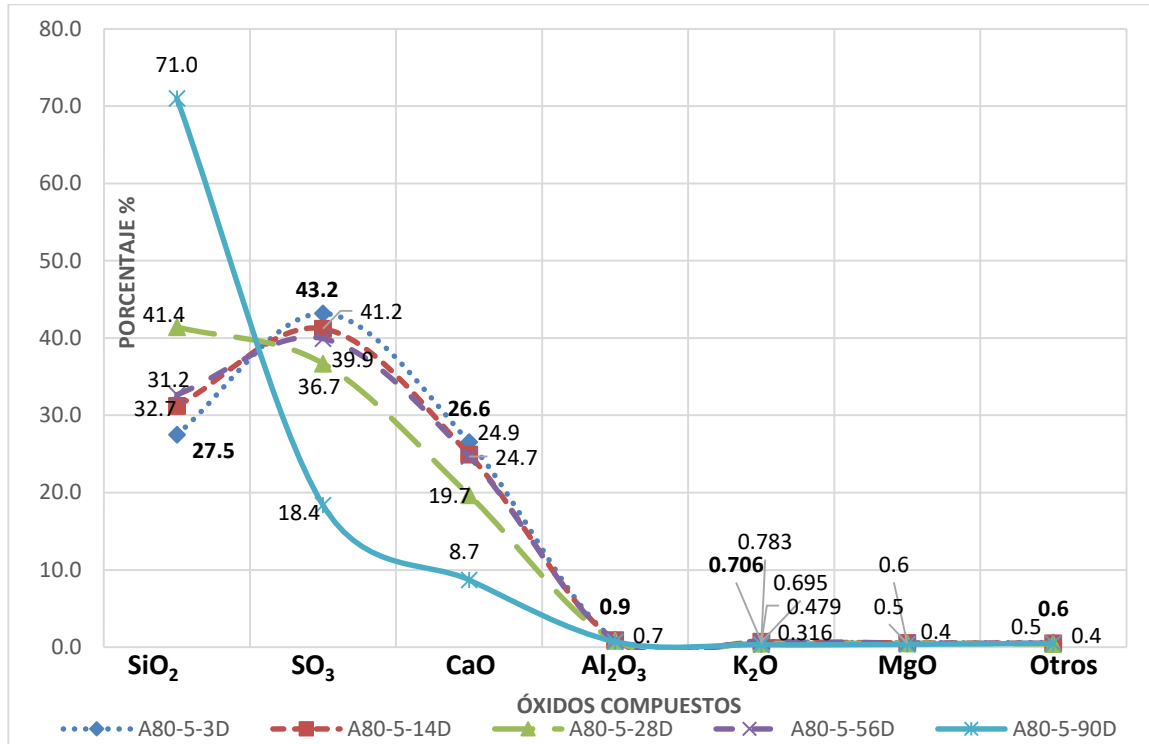
Mediante los resultados FRX se conocen los óxidos elementales que componen a la muestra A80-5, donde se identifican los de mayor presencia como el óxido de Silicio, que confirma los resultados DRX. Así mismo, el sulfato (SO_3), el óxido de Calcio (CaO) y en menor proporción el óxido de Aluminio (Al_2O_3), óxido de Potasio (K_2O) y óxido de Magnesio (MgO), **Gráfica 27**.

Durante las diferentes edades de hidratación se aprecian variaciones en el contenido de los compuestos, las más evidentes en el sulfato, el óxido de Calcio y, en menor proporción, en el óxido de Aluminio con variaciones de 43, 33 y 12% respectivamente, que suceden al paso de los 3 a los 90 días de hidratación.



Gráfica 26. Análisis de comportamiento térmico realizado en tres ensayos para muestras con diferentes dosificaciones de aditivo.

Lo contrario a esta reacción se aprecia en el óxido de Silicio, pues se incrementa de un 27% a los 3 días, hasta un 71% del total del compuesto a los 90 días, **Gráfica 27**. Este fenómeno lo explica *Pierre Claude*, que menciona que los sulfatos y los óxidos de Calcio, ceden átomos durante la reacción de hidratación de los compuestos, por lo que van perdiendo presencia y van cediendo espacio a otros compuestos; en este caso al óxido de Silicio en este estudio, [35].



Gráfica 27. FRX Composición de óxidos en diferentes edades de hidratación.

La microscopía mostró el mejoramiento de la compatibilización de la partícula de AS en la mayor parte de la zona de interfaz, pero en la parte superior se percibe que aún se tiene separación con el mortero **Figura 70 a)**. Mientras tanto, en la EDS se observó una partícula de arena Sílica del mortero además de los elementos que integran al componente como Calcio (17.8%). Azufre (9.2%) y Silicio (5.9%); por lo tanto, coinciden con los estudios de FRX, contenido del Magnesio, Aluminio y Potasio, **Figura 70 b)**.

Con los resultados se puede determinar que la pasta MC+25%A3100 presentó una conductividad térmica de alta eficiencia, con 0.111W/mK [218], pero su resistencia es baja, para cumplir las diferentes normativas [28] [219] [220] [221] [222] [223]. La pasta MC+25%A3100+3%COP tiene una resistencia para

utilizarse en bloques e impresión 3D. Su propiedad térmica es de 0.144 W/mK, aislamiento de eficiencia media [218].

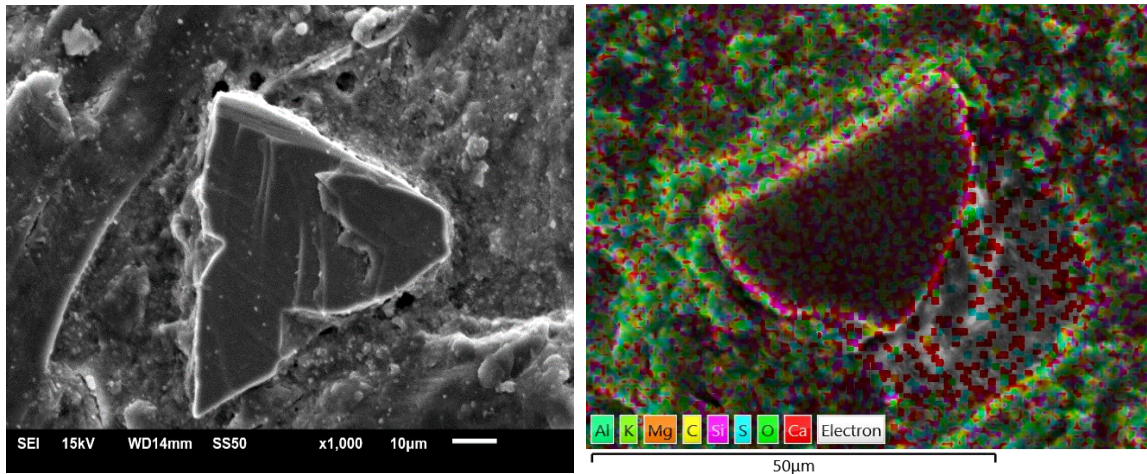


Figura 70. Microscopía de partícula de AS modificado e imagen EDS donde se observan los elementos de composición del mortero.

Se consiguieron dos morteros con propiedades de resistencia mecánica y térmica que cumplen las normativas para morteros de yeso calcinado ASTM-270 y pueden aplicarse como recubrimiento aislante, en bloques no estructurales (ASTM C129), bloques estructurales e impresión 3D (NMX C404-ONNCCE y cementos espumados respectivamente). El mortero MC+80%A3100+5%COP con resistencia a la compresión de 13.35 MPa, es un 14% más resistente que el MC+65%A3100+3%COP; además, con una conductividad de 0.34 W/mK que lo convierte en la mejor opción para el estudio de simulación energética.

Los resultados son similares a los obtenidos en otras investigaciones como el mortero de Anhidrita con aerogel modificado con COP de *Sanz Pont* o el obtenido por *Lu* con silano con 0.26 y 0.337 W/mK respectivamente; la pasta de Guerra-Cossío obtenida con un proceso de aireado alcanza una conductividad

de 0.26 W/mK mientras la pasta MC+25A3100+3COP la mitad con 0.138 W/mK,

Tabla 46.

Tabla 46. *Propiedades de pastas y morteros comparados con otras investigaciones.*

Autor	Compuesto	Composición	AS	Mpa	W/m.K
Fickler	Concreto	HPC+AS	60%	10	0.17
Abbas		Cáscara de arroz+AS	60%	8.85	0.327
Pingua Zhu	Concreto	HPC+AS	80%	6	0.2
Lu	Mortero	Cem+AS Modificado silano	25%	3.4	0.337
	Mortero		66%	1.2	0.067
Hanif	Mortero	Ceniza volante+AS	80%	18	0.3199
Zhen	Concreto	HPC+AS	50%	20	0.55
	Concreto		60%	18.1	0.4
	Concreto		70%	1.7	0.25
Guerra-Cossío	Pasta	AN+EAH+MS Proceso de aireado			0.261
	Mortero	AN+EAH+MS		20 Mpa	
Sanz Pont	Pasta	Anhidrita+AS Modificado cop	60%	2.38	0.16
	Mortero	AN+CEM+ARENA+AS	60%	10	0.26
AN+EAH+MS+AS	Pasta	MC+25A3100+3COP	25%	4.64	0.138
	Mortero	MC+80A3100+5COP	80%	13.35	0.348

Etapa V

4.6 Modelación y simulación energética.

Se realizó el modelo de la vivienda proporcionada por Metrocasas Residenciales S.A de C.V con las especificaciones constructivas, la ubicación y la orientación. Se procedió a realizar los estudios de evaluación para obtener parámetros de desempeño y comportamientos de la construcción en modo de funcionamiento pasivo, considerando las condiciones ambientales como el clima, el asoleamiento y la radiación solar, todo a través del programa Design Builder versión 6, **Figura 71**.

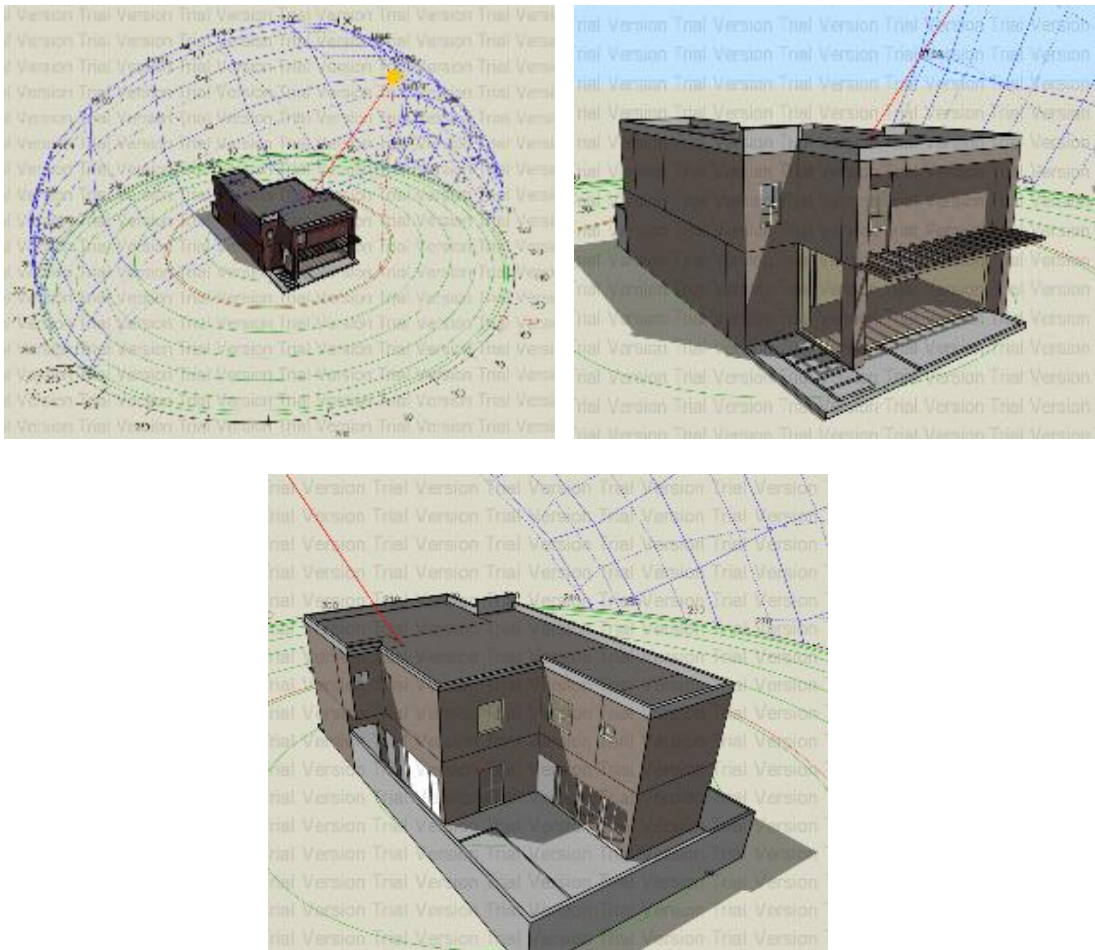


Figura 71. Modelación de vivienda con ubicación y orientación geográfica para aplicar afectantes climáticas de la zona térmica, como es el caso del asoleamiento, temperatura exterior y radiación solar.

En la **Tabla 47** se muestran los resultados obtenidos en pastas y morteros para compararse con algunos estándares y normativas. Uno de los mejores resultados es el obtenido por la pasta MC+25%A3100 y la MC+25%A3100+3%COP, que presentan conductividades de 0.111 y 0.144 W/mK respectivamente, casi llegando al intervalo establecido de 0.1 W/mK para los materiales aislantes térmicos [6].

La primera pasta no cumple la resistencia mecánica a la compresión, de 2.8 a 5.2 MPa, que es señalada en la ASTM 270 [28], pero la segunda cumple adecuadamente esta condición señalada para los morteros de yeso calcinado y revestimiento, además de los estándares de resistencia de 3.40 a 5.00 MPa señalados en NMX C-441-ONNCCE, UNE 411668 y ASTM C129 para bloques no estructurales y para impresión 3D, respectivamente, **Tabla 47**.

En lo que respecta a los morteros, las mejores condiciones presentadas son del MC+65%A3100+1%COP y MC+80%A3100+5%COP, que además de obtener resistencias a la compresión más arriba de las normativas, presentan baja conductividad térmica de 0.312 y 0.34 W/mK, donde se encuentran los materiales con características aislantes, **Tabla 47**.

Para el estudio de simulación energética se tomará la conductividad térmica del mortero MC+80%A3100+5%COP, que presenta las mejores condiciones mecánicas.

Tabla 47. Propiedades de pastas y morteros comparados con normativas.

Aplicación	Identificación de muestra	Resistencia a la Compresión MPa (días)	Conductividad Térmica W/m.K (28 días)	Resistencia Térmica °C.m/W (28 días)
Pasta	MC	3.83	0.161	6.22
Pasta	MC+25%A3100	1.99	0.111	9.01
Pasta	MC+25%A3100+3%COP	4.64	0.144	6.95
Mortero	MC+1%COP	8.32	0.5	2.06
Mortero	MC+65%A3100+1%COP	6.55	0.312	3.07
Mortero	MC+80%A3100	3.18	0.2414	4.08
Mortero	MC+80%A3100+5%COP	9.61	0.34	2.91
Morteros	ASTM 270 (Yeso calcinado)	2.8 - 5.2	≤	
	UNE 998-2-2010 (Revestimiento)	3.5 a 7.5	0.1 Alto, 0.2 Medio	
Bloques No estructurales	NMX C-441-ONNCCE	3.4		
	UNE 411668	4 a 5		
	ASTM C129	3.45 - 4.14		
Bloques Uso estructural	NMX C-404-ONNCCE	5.8		
Impresión 3D	Cemento espumado	4		

4.6.1 Cálculo de resistencias térmicas por medio del método simplificado prescriptivo para muros.

Al realizar la simulación de los diferentes sistemas constructivos propuestos para el mejoramiento de las envolventes, elaborado a través del programa Design Builder; se obtuvieron las resistencias térmicas o valor “R”, además de los coeficientes de transmitancia de calor o valor “U”, con parámetros muy similares a los obtenidos por el método simplificado de la NMX-C-460, con variaciones muy pequeñas de 1 al 3%, confirmando que los resultados son correctos para ser tomados en el estudio de eficiencia energética, **Tabla 48.**

Tabla 48. Cálculo de la Resistencia Total en muros método simplificado prescriptivo de aplicación manual de la NMX-C-460 y comparativa con calculos obtenidas por simulación.

Método simplificado de aplicación manual prescriptiva					Simulación Design Builder	
Componentes del muro	Grosor	Conductividad térmica	Resistencia Térmica	Transmisión térmica	Resistencia térmica	Transmisión térmica
	m	W/m.K	m ² .k/W	W/m ² .K	m ² .k/W	W/m ² .K
Prototipo Santa Barbara SCO	Recubrimiento exterior con mortero Cem-arena 1:5	0.015	1.300	0.012		
	Block hueco de concreto 15x40x20, resistencia 6.86 Mpa	0.150	2.000	0.075		
	Recubrimiento interior de pasta de yeso	0.015	0.400	0.038		
	Conductancia térmica superficial exterior he		13.000	0.077		
	Conductancia térmica superficial exterior hi		8.100	0.123		
	RT Estructurada		0.324	3.082	0.315	3.179
Propuesta 1 Recubrimiento AS REXT	Rec. Ext. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.02	0.345	0.043		
	Block hueco de concreto 15x40x20, resistencia 6.86 Mpa	0.150	2.000	0.075		
	Recubrimiento interior de pasta de yeso	0.015	0.400	0.038		
	Conductancia térmica superficial exterior he		13.000	0.077		
	Conductancia térmica superficial exterior hi		8.100	0.123		
	RT Estructurada		0.356	2.806	0.348	2.877
Propuesta 2 Recubrimiento AS REXT-INT	Rec. Ext. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.015	0.345	0.043		
	Block hueco de concreto 15x40x20, resistencia 6.86 Mpa	0.150	2.000	0.075		
	Rec. Int. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.015	0.345	0.043		
	Conductancia térmica superficial exterior he		13.000	0.077		
	Conductancia térmica superficial exterior hi		8.100	0.123		
	RT Estructurada		0.362	2.760	0.362	2.760
Propuesta 3 Recubrimiento y mampostería AS RTAB	Rec. Ext. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.02	0.345	0.043		
	Tabique de 14X28X7 cms. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.14	0.345	0.406		
	Rec. Int. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.015	0.345	0.043		
	Conductancia térmica superficial exterior he		13.000	0.077		
	Conductancia térmica superficial exterior hi		8.100	0.123		
	RT Estructurada		0.693	1.443	0.715	1.399
Propuesta 4 Recubrimiento e impresión 3D AS 3D	Rec. Ext. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.02	0.345	0.043		
	De Mortero AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.02	0.345	0.043		
	Aire en espacio vacío en muro impreso	0.11	0.0259	4.054		
	Rec. Int. AN+EAH+MS+80%A3100+5%COP	0.015	0.345	0.043		
	Conductancia térmica superficial exterior he		13.000	0.077		
	Conductancia térmica superficial exterior hi		8.100	0.123		
	RT Estructurada		4.385	0.228	4.368	0.229

Las propiedades térmicas de los sistemas evaluados exterior y exterior-interior (REXT y REXT-INT), se contrastaron con las del sistema constructivo original (SCO), donde se observó que el sistema de recubrimiento presenta mínimos beneficios, pues la resistencia térmica sólo se mejora en un 9 y un 11% respectivamente, datos que fueron confirmados por simulación.

La transmitancia del calor del sistema Recubrimiento y mampostería (RTAB) con respecto al SCO, presenta un incremento en la resistencia térmica del 47%, además de un valor “R” de 0.693 en comparación con 0.324 m²K/W respectivamente, pero, aun así, no se alcanza el valor “R” mínimo requerido de 1.00 m²K/W, determinado para la zona térmica 3A, 3B y 3C o zona climática internacional Cfa, BSk/BWh/H y Cs (Clasificación Köppen) [93].

El sistema constructivo de muro impreso (3D), tiene la mejor efectividad, alcanzando una resistencia térmica de 4.385 m²K/W, cumpliendo el parámetro mínimo (1.00), de habitabilidad (1.80) y para ahorro de energía (2.10), de acuerdo con la zona geográfica donde se ubica el proyecto, **Tabla 48**.

4.6.2 Simulación en modo pasivo.

Se calcularon las temperaturas operativas del área social de la vivienda, en una frecuencia diaria durante el período de un año (2021), para obtener su comportamiento con referencia al intervalo de confort adaptativo del 90 y el 80% de aceptación, según el ASHRAE 55 [127]. Se ubicó la semana del 14 de enero como la extrema del invierno y la del 31 de Julio 2021 como la extrema del verano.

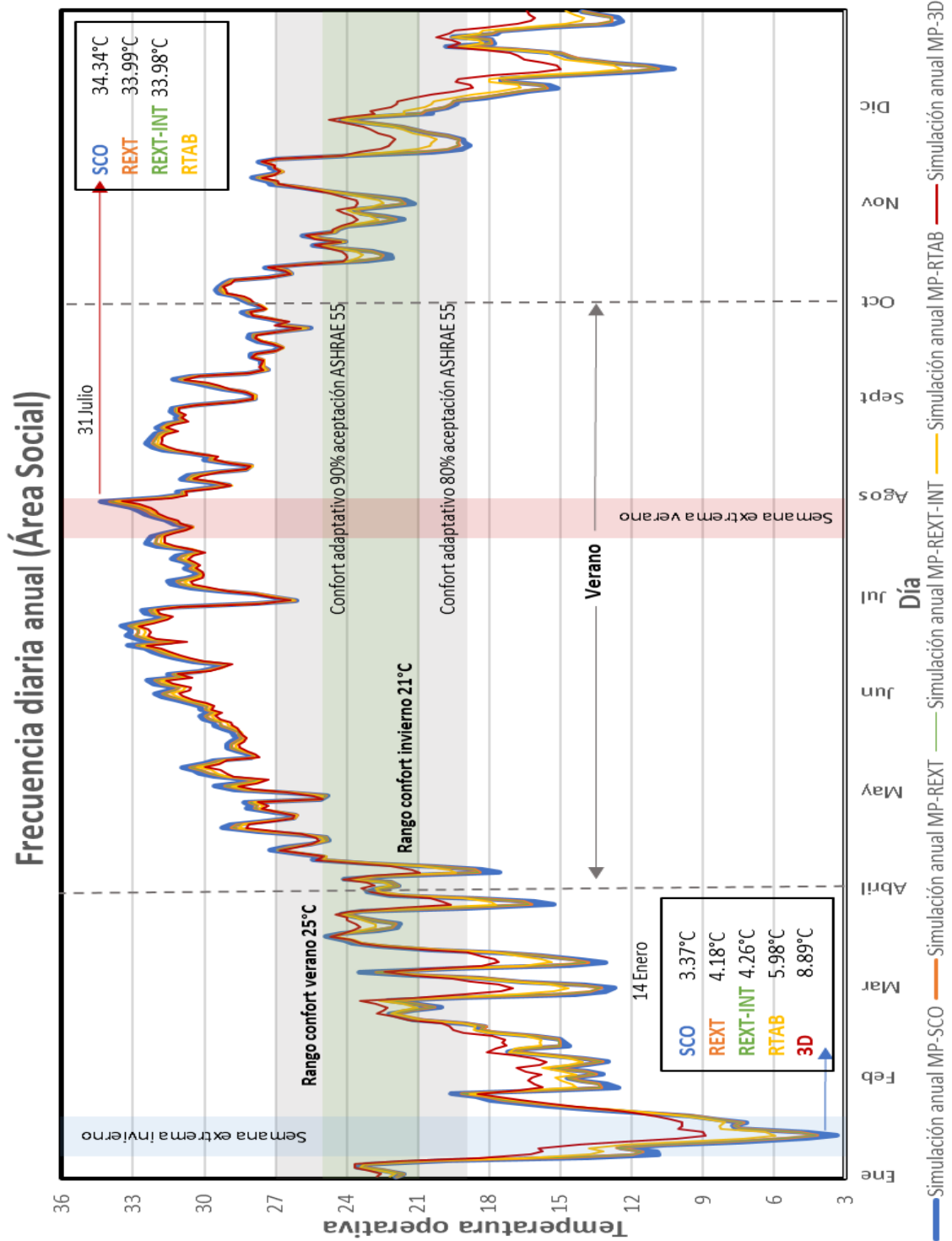
La simulación anual permite conocer que el problema de disconfort es mayor durante el verano, donde se presenta una cantidad superior de días con temperaturas operativas fuera del intervalo de confort; por lo tanto, hace evidente que el aislamiento térmico es más importante durante el verano y que se requiere mayor energía para climatizar los espacios durante ese período climático,

Gráfica 28.

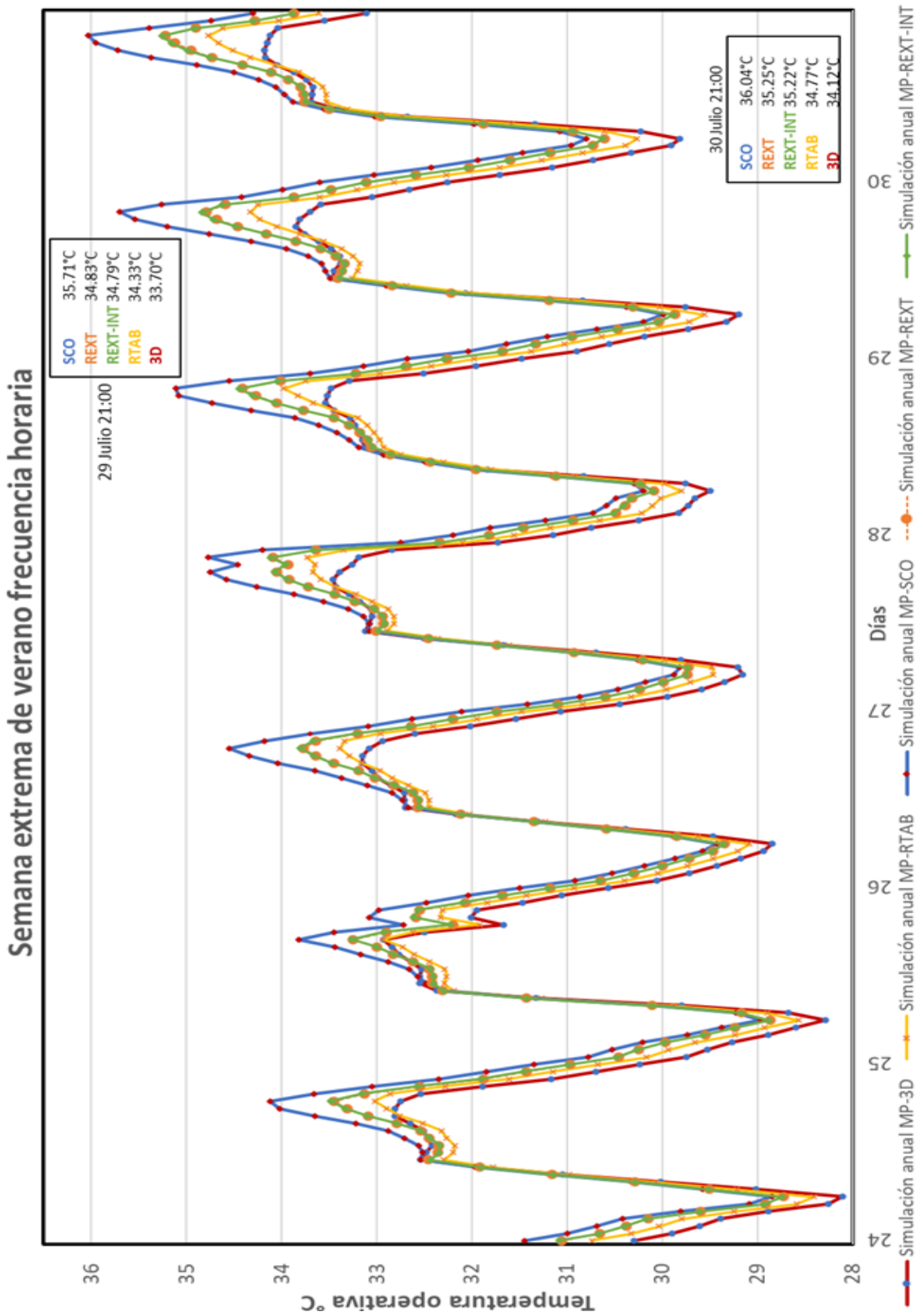
Se obtuvieron las temperaturas operativas de cada uno de los sistemas constructivos evaluados durante el día más caliente (31 de julio) y en el más frío del año (14 de enero), donde se presentan diferencias con respecto al SCO del 1% en los sistemas REXT y REXT-INT, del 2% en el RTAB y 3% en la propuesta 3D que presentó el mejor aislamiento, alcanzando una temperatura de 33.47 en comparación con 34.34°C del SCO, **Gráfica 28.**

Las temperaturas resultantes de los sistemas REXT y REXT-INT son muy similares, presentan los mismos comportamientos térmicos. Como se observó igualmente en el cálculo de sus propiedades de resistencia y transmitancia de calor, no se percibe mayor beneficio de uno contra el otro. En la simulación de la temperatura operativa con frecuencia horaria de la semana extrema de verano,

se tienen reducciones de 1 a 2°C en los sistemas RTAB y 3D, respectivamente, de 35.71°C del sistema SCO a 33.70°C del 3D, **Gráfica 29**.

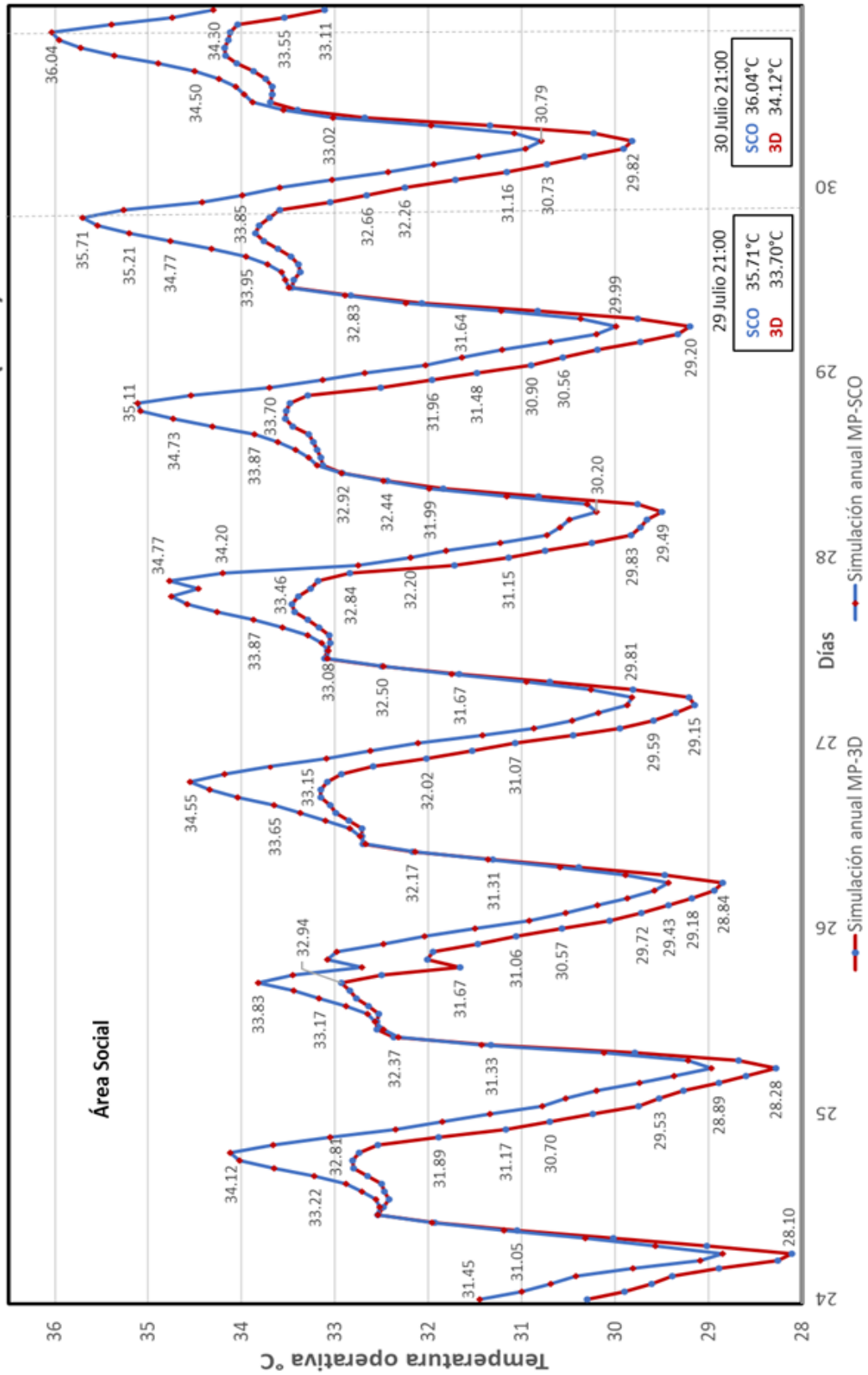


Gráfica 28. Temperatura operativa anual 2021 (Área social).



Gráfica 29. Temperatura operativa, semana extrema de verano 2021 (Área social).

Semana extrema de verano frecuencia horaria (Julio)



Gráfica 30. Temperatura operativa, semana extrema SC0 y 3D en Modo Pasivo (MP), área social.

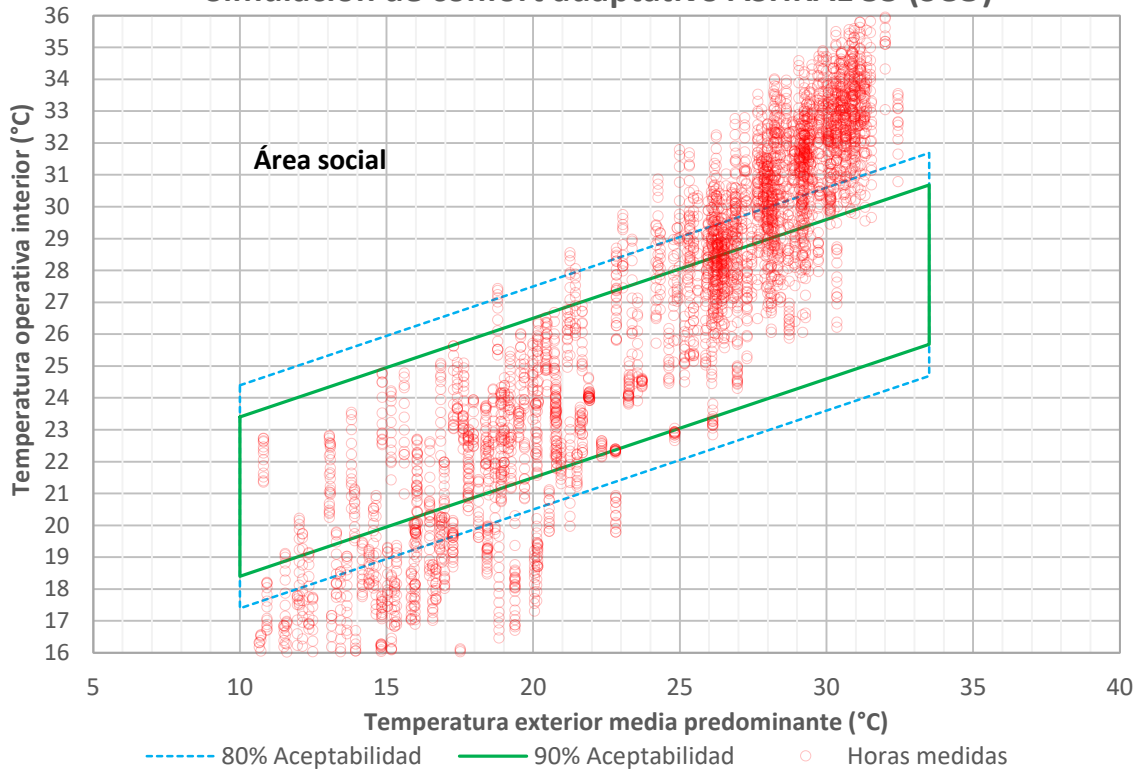
En los días con temperaturas operativas más elevadas de la semana extrema de verano (29 y 30 de julio), se compara el comportamiento del sistema SCO contra el 3D de mayor eficiencia, presentando diferencias de 2°C a las 21:00 hr en ambos días, de 35.71 a 33.70°C y de 36.04 a 34.12°C respectivamente, una reducción considerable pero aún muy por arriba del intervalo de confort.

Con estos resultados se puede analizar que el sistema 3D, por tener mayor masa térmica, es el que obtiene mejores condiciones, por lo que cabe mencionar que sería conveniente realizar un estudio posterior con una propuesta de mayor espesor; por lo tanto, en este estudio se advierte que los sistemas de climatización son imprescindibles, además del aislamiento térmico propuesto, **Gráfica 30.**

En la simulación anual en frecuencia horaria se muestra la temperatura operativa y el grado de confort adaptativo de los sistemas SCO y 3D. En el primero la dispersión es más concentrada, fuera de la zona de confort, a temperaturas mayores, con un gran número de horas por arriba de los 34 y 35°C, en algunos casos hasta alcanzar los 36°C, **Gráfica 31.**

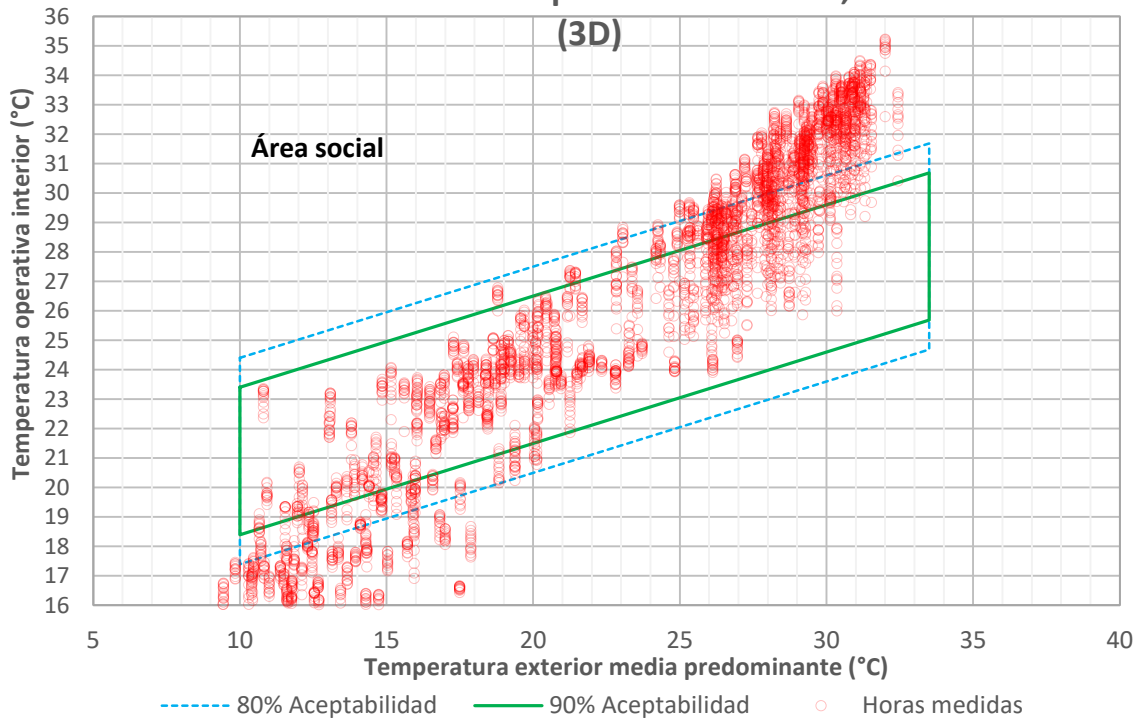
En comparación con las temperaturas del sistema 3D, reflejan una dispersión con concentración igualmente en el área de temperaturas altas fuera de la zona de confort; pero se reduce y se concentran en los 32 a 34°C y muy pocas veces llegan a los 35°C. Es preciso señalar que la dispersión es de mayor concentración hacia la zona de confort del 90 y el 80% de aceptabilidad, **Gráfica 32.**

Simulación de confort adaptativo ASHRAE 55 (SCO)



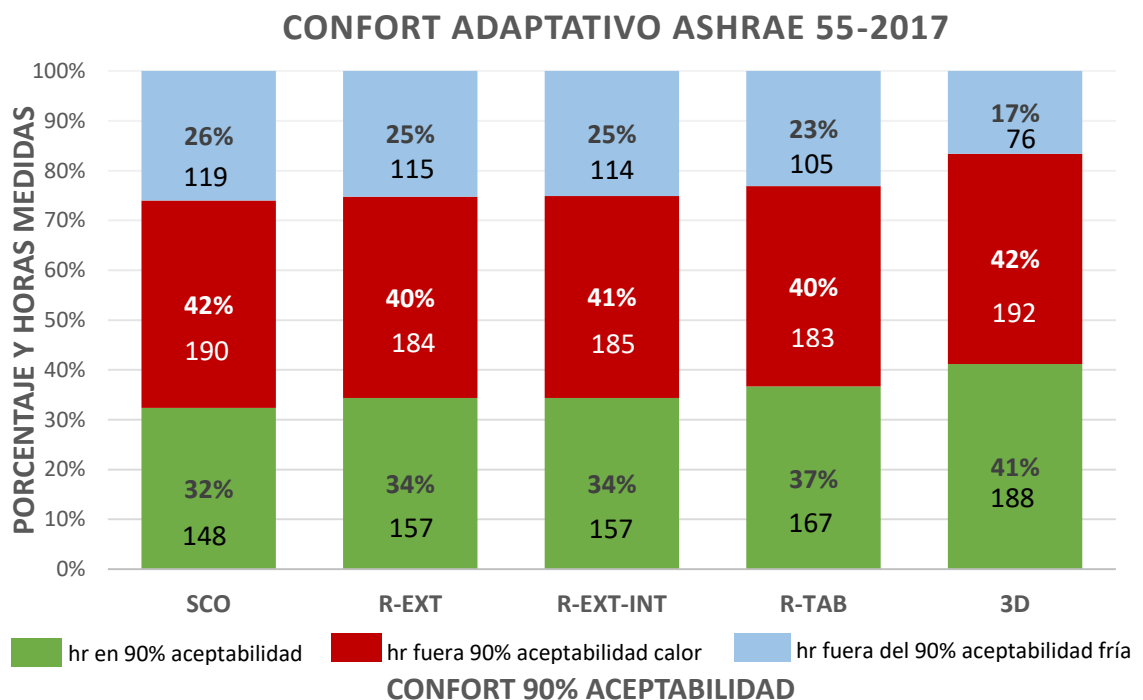
Gráfica 31. Simulación horaria anual SCO (Área social).

Simulación de confort adaptativo ASHRAE 55, Área Social (3D)



Gráfica 32. Simulación horaria anual 3D (Área social).

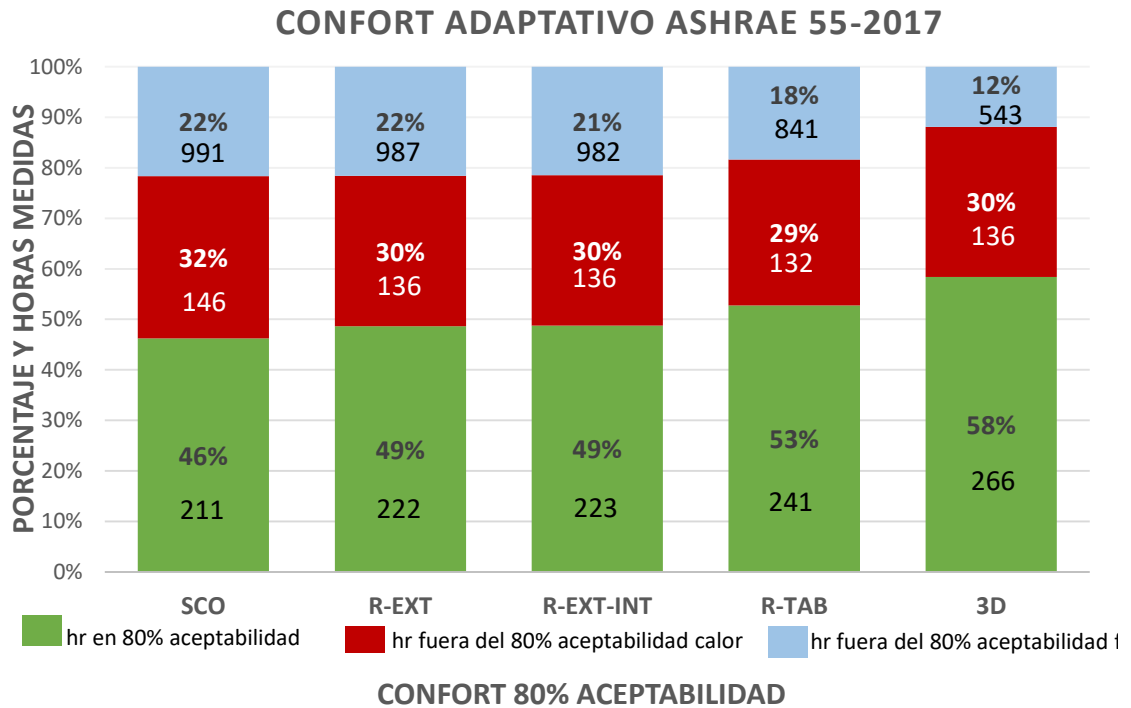
Con esta simulación se puede contabilizar el número de horas dentro de la zona de confort, del 90% de aceptabilidad, donde el sistema SCO cumple un 32% de horas en confort en la temporada caliente, en disconfort el 42% más el 26% en la temporada fría. Los sistemas REXT y REXT-INT presentan relativamente los mismos porcentajes, pero las variantes más notorias se obtuvieron en los sistemas RTAB y 3D. Este último obteniendo el 41% en horas de confort en temperatura caliente, 9% más con respecto al SCO, porcentaje que también se consigue en la temporada fría. **Gráfica 33.**



Gráfica 33. Horas dentro del 90% de confort adaptativo (Área Social).

Los porcentajes de horas dentro de la zona de confort del 80% de aceptabilidad tienen la misma tenencia. En el caso del sistema SCO, con un 46% y en el 3D hasta un 58%. Esto representa un incremento del 14 y el 17%, con

respecto al resultado de las horas en zona de confort del 90% de aceptabilidad. Los sistemas REXT y REXT-INT con los mismos porcentajes entre ambos sistemas constructivos, comprobando que no hay mucha diferencia en sus comportamientos térmicos, **Gráfica 34**.



Gráfica 34. Horas dentro del 80% de confort adaptativo (Área social).

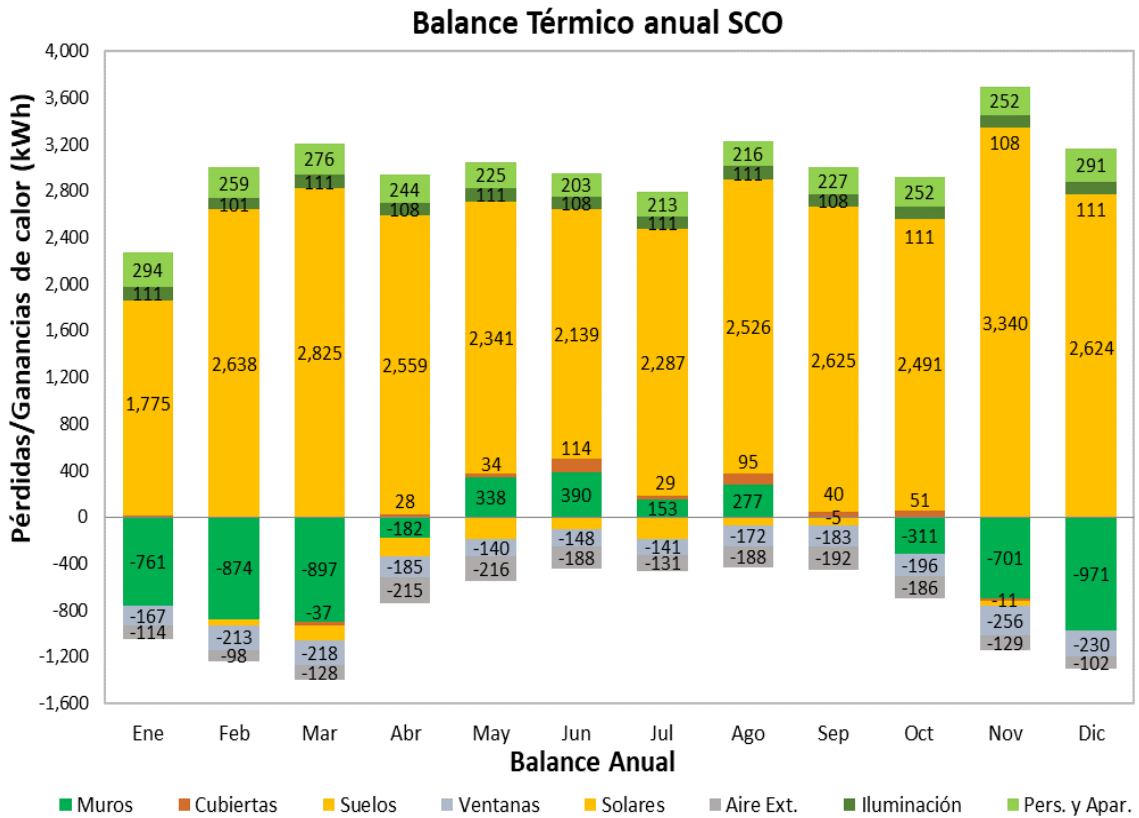
La simulación del balance térmico del sistema SCO para conocer las pérdidas y ganancias de calor, muestran que los muros durante el invierno presentan el fenómeno de pérdida de calor hasta de 897 y 971 kWh en el mes de marzo y diciembre, respectivamente; efecto que se reduce en gran medida por medio del aislamiento del sistema 3D, donde las mayores pérdidas son de 353 y 406 kWh presentados en febrero y marzo, **Gráfica 35 y 36**.

En cuanto a las ganancias de calor, se tienen los valores más altos durante los meses de mayo y junio con 338 y 390 kWh en el sistema SCO, mientras este fenómeno se minimiza con el valor más alto de 71 kWh en el mes de junio, con el sistema 3D, **Gráfica 35 y 36**.

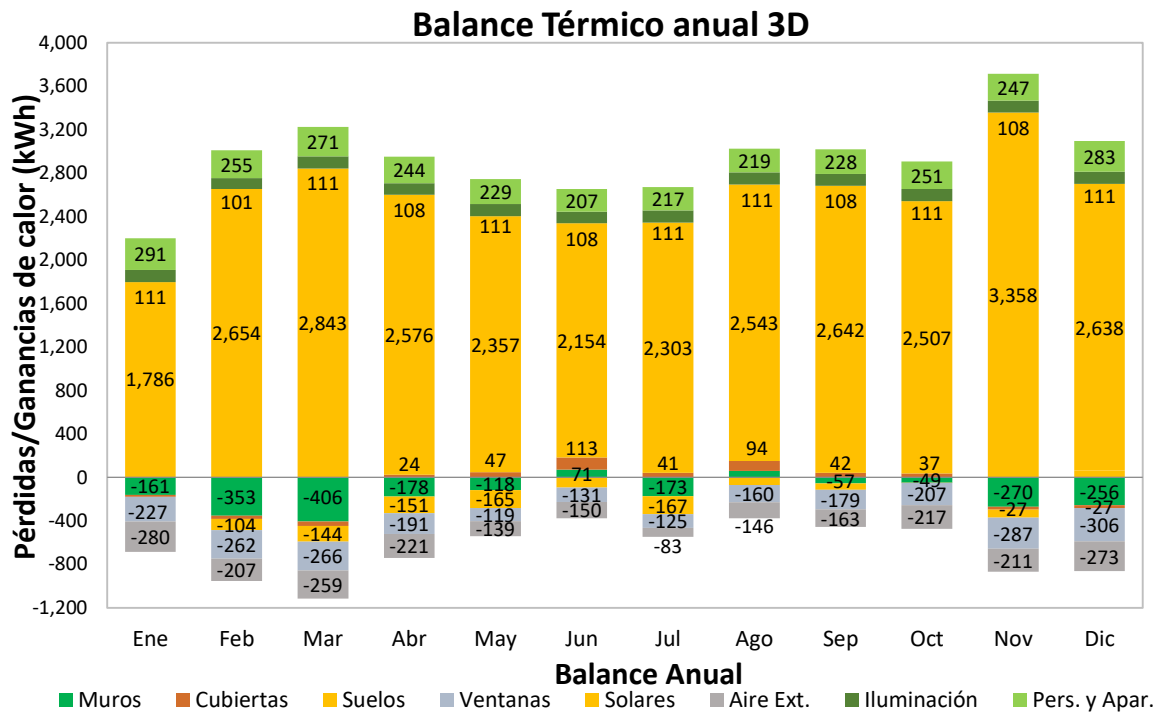
La ganancia de calor a través de la radiación solar representa el 70%, mientras que los muros tienen un balance térmico hacia la pérdida de calor con un 8%, casi en la misma proporción que la ganancia generada por aparatos y personas en el sistema SCO con 7%, **Gráfica 37**. Este valor se modifica en la simulación 3D, donde el mejoramiento del aislante modifica la pérdida de calor en muros hasta reducirla a un 4% por debajo de lo obtenido por ventanas, aire exterior y radiación solar, **Gráfica 38**.

Con el balance térmico anual de los muros en cada uno de los sistemas, se puede observar que las ganancias de calor más elevadas hasta de 390 kWh se presenta en SCO durante el mes de mayo, al igual que en los sistemas REXT y REXT-INT, ambos en un valor menor que 201 y 198 kWh, en el mismo mes. Las menores ganancias se dan en 3D con valores de 71 y 58 kWh en mayo y julio, **Gráfica 39**.

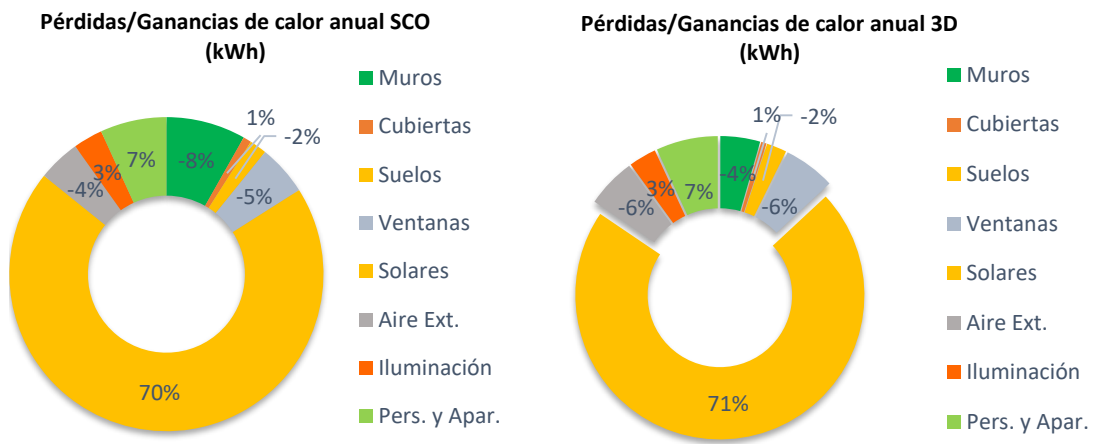
Los valores de pérdida de calor son muy elevados, comparados con los de ganancia de calor. Los sistemas REXT y REXT-INT son los que pierden hasta 992 y 994 kWh en el mes de diciembre y marzo. Las menores pérdidas se dan en 3D, con no más de 406 kWh, que se presenta también en el mes de marzo, este último sistema con el comportamiento más cercano al balance térmico presentando una gráfica más lineal, **Gráfica 39**.



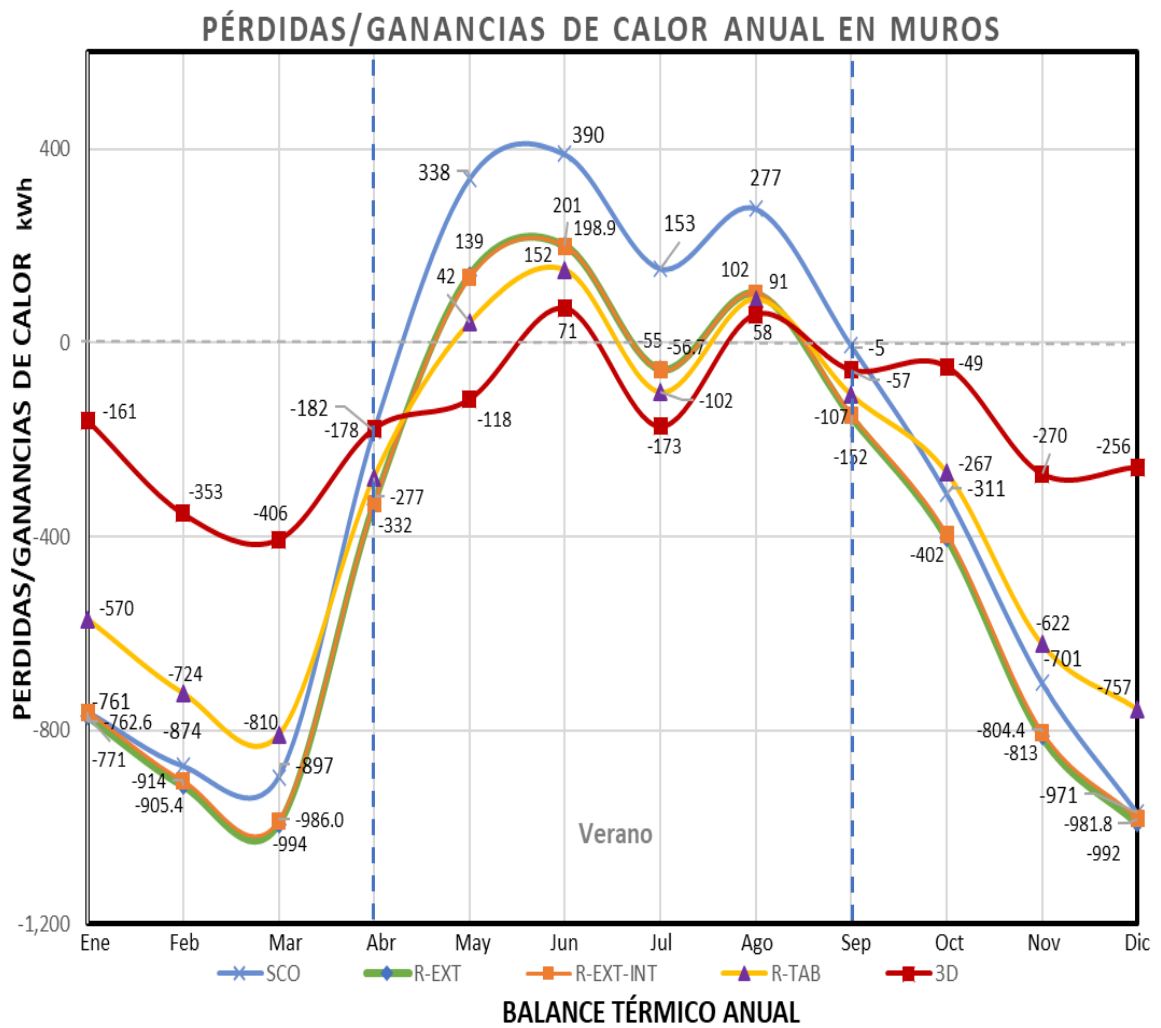
Gráfica 35. Balance térmico anual de pérdida y ganancias de calor SCO.



Gráfica 36. Balance térmico anual de pérdida y ganancias de calor 3D.



Gráfica 37 y 38. Balance térmico desglosado de pérdida y ganancias de calor SCO y 3D.



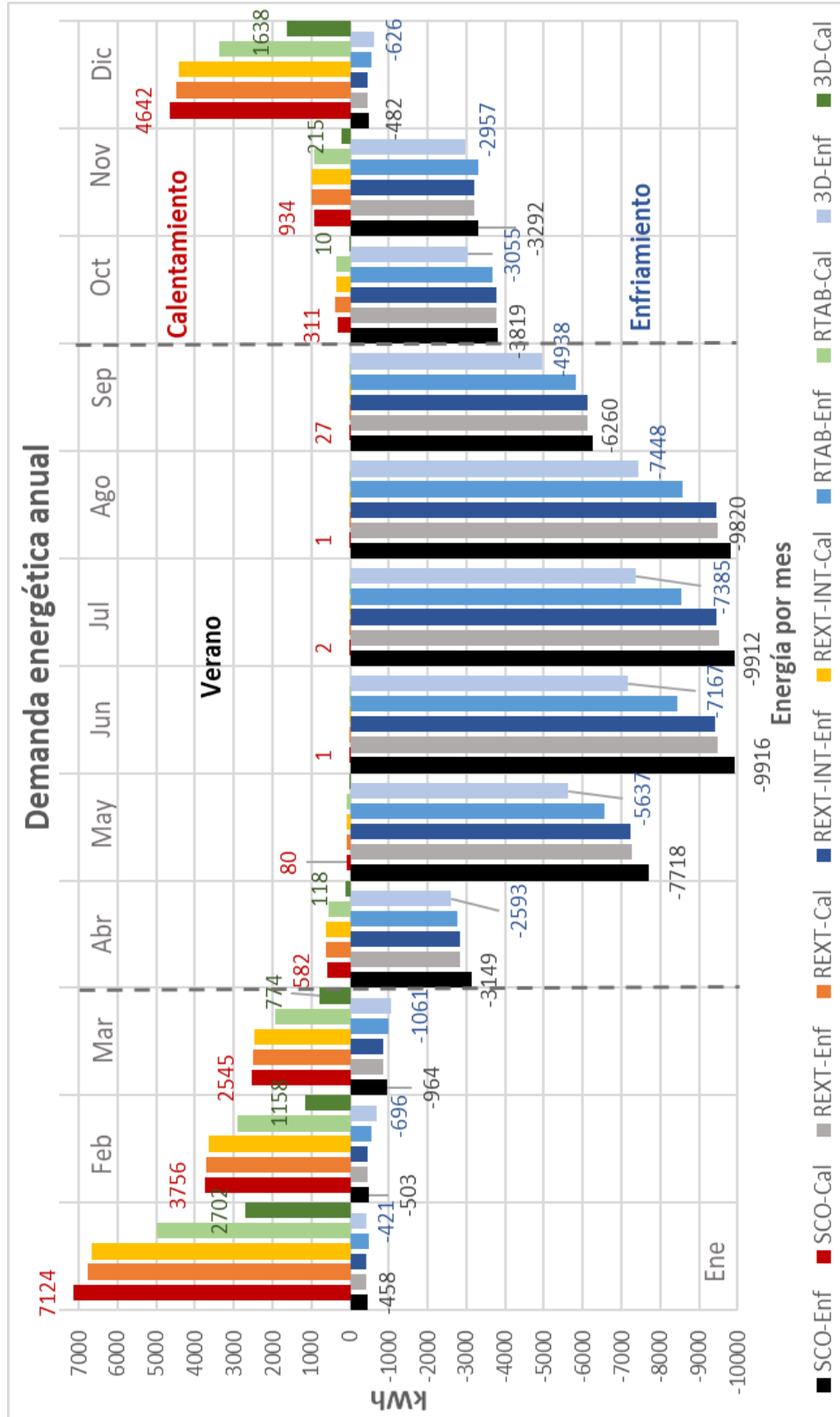
Gráfica 39. Balance térmico anual de pérdida y ganancia de calor en muros.

4.6.3 Simulación en modo mecánico.

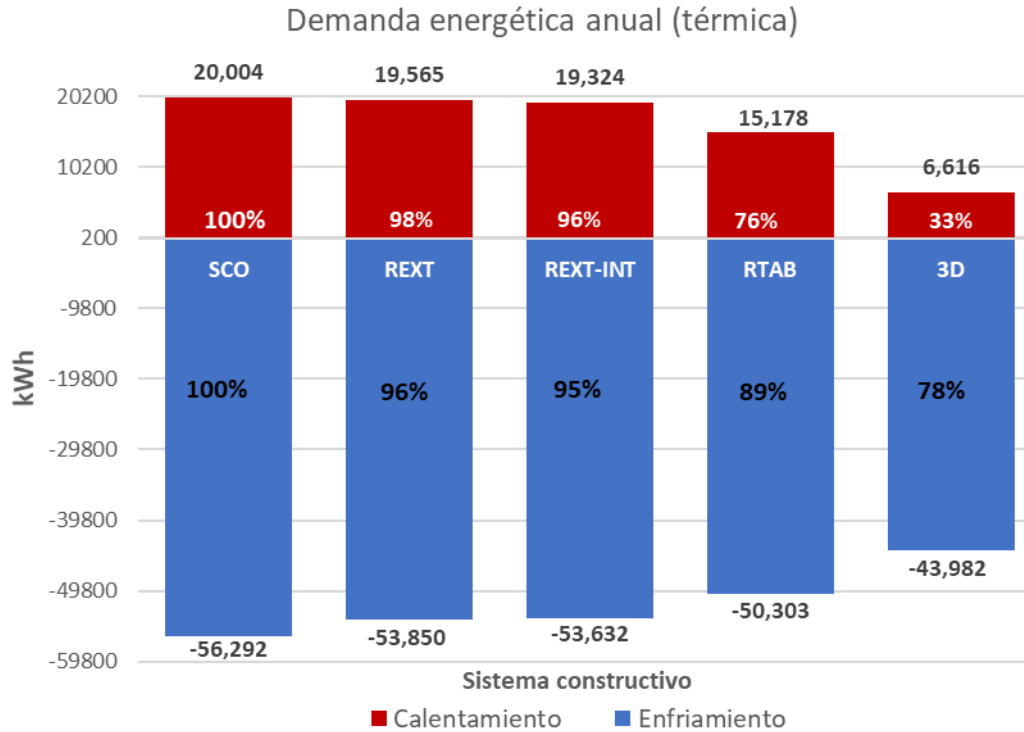
En modo mecánico la simulación de demanda energética anual necesaria para tener las condiciones de confort, muestran que los sistemas mejorados con el MC+AS reducen la energía requerida tanto para el enfriamiento como para el calentamiento de los espacios. El sistema SCO requiere mayor energía y con el mejoramiento del 3D se reduce la demanda, **Gráfica 40**.

El enfriamiento de los espacios es necesario durante todo el año. Se necesita mayor energía, en comparación con el calentamiento que mayormente se demanda sólo durante el período de invierno. Los meses con mayor consumo de energía son de mayo a agosto, con hasta 9,916 y 9,912 kWh en junio y julio, respectivamente, siendo el sistema SCO el de mayor incidencia, mientras es evidente la reducción de energía en el sistema 3D, con consumos de 7,448 y 7,385 kWh en el mes de agosto y julio respectivamente, **Gráfica 40**.

La energía necesaria para climatizar en SCO suma 20,004 y 56,292 kWh de calentamiento y enfriamiento respectivamente, con un total de 76,296 kWh anual y, de acuerdo con el método de HVAC simple, con el coeficiente de ocupación (CoP) se calcula una demanda de 44,743 kWh anual, **Gráfica 41 y Tabla 49**. El sistema mejorado y aplicado por medio de impresión 3D proyecta una reducción muy considerable de demanda de energía anual, hasta llegar al 33% de la utilizada por el SCO, calculando 6,616 y 43,982 kWh para calentamiento y enfriamiento respectivamente, llegando a utilizar 50,598 kWh durante un año y con el CoP serían 24,944 kWh anual, representando el 55% de lo utilizado en el sistema SCO, **Gráfica 41 y Tabla 49**.



Gráfica 40. Demanda anual de energía para enfriamiento y calentamiento de espacios.



Gráfica 41. Energía térmica anual para climatización de espacios.

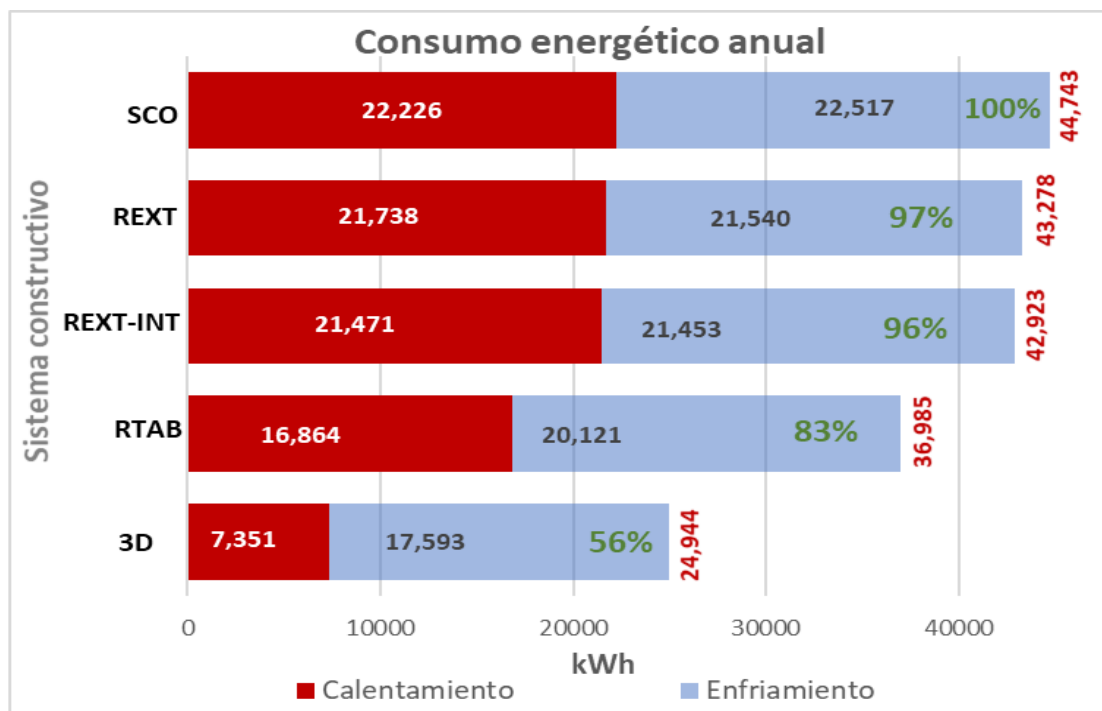
Tabla 49. Cálculo de consumo totales de energías para climatización (kWh).

Consumo energía térmica climatización					
	SCO	REXT	REXT-INT	RTAB	3D
Calefacción	20,004	19,565	19,324	15,178	6,616
Enfriamiento	56,292	53,850	53,632	50,303	43,982
	76,296	73,415	72,956	65,481	50,598
Consumo con coeficiente de desempeño estacional (CoP) Método HVAC Simple					
	SCO	REXT	REXT-INT	RTAB	3D
Calefacción / 0.90	22,226	21,738	21,471	16,864	7,351
Enfriamiento / 2.5	22,517	21,540	21,453	20,121	17,593
	44,743	43,278	42,924	36,985	24,944

La demanda de energía para climatizar en los sistemas REXT y REXT-INT, se reduce solamente en un 2 y 4% en calefacción y un 4 y 5% en refrigeración. Mientras tanto, el RTAB disminuye el consumo en 24 y 11% menos,

Gráfica 42; con el método de HVAC simple se calculó que la energía anual se estima en 43,278, 42,924 y 36,985 kWh respectivamente, representando un 3, 4 y 17% menos, en comparación con el SCO, **Tabla 49 y Gráfica 42.**

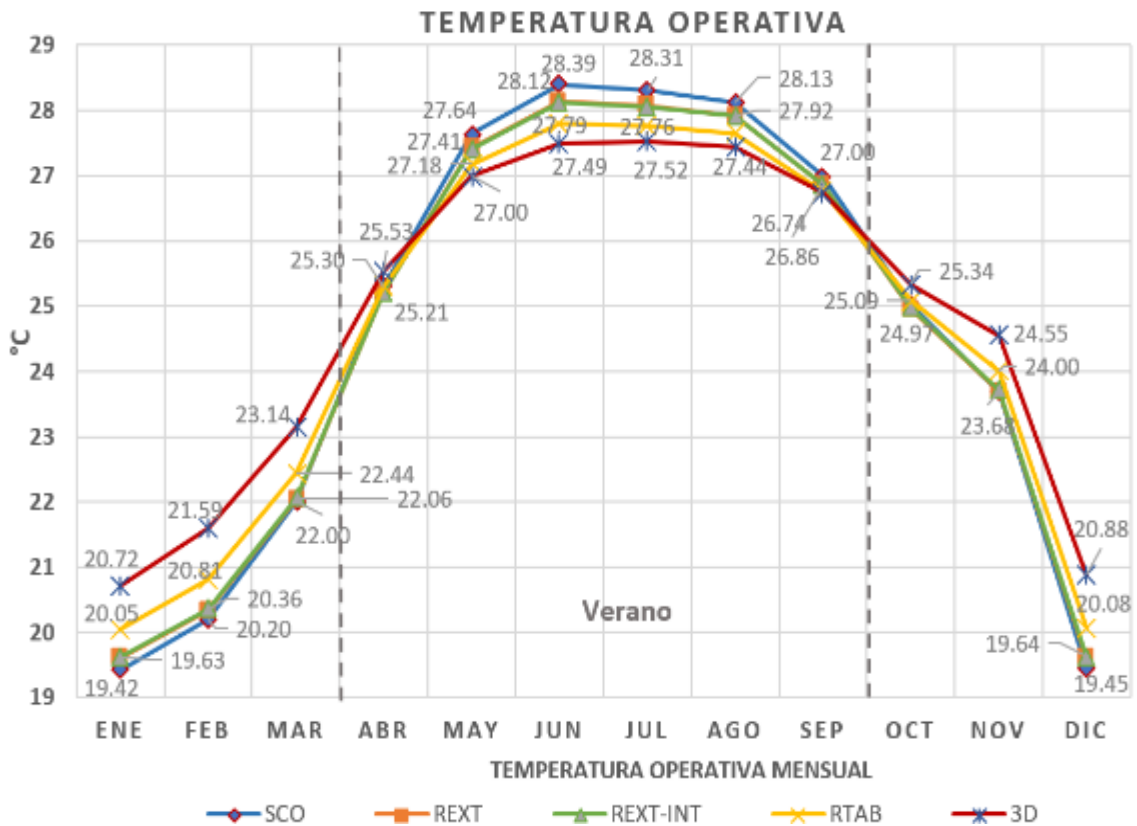
De acuerdo con la simulación energética del año 2021, el sistema 3D es el de mayor eficiencia, ya que se estima que ahorra hasta un 44% del consumo de energía anual para climatización; por lo tanto, es el de mayor ahorro entre todos los sistemas constructivos evaluados, **Gráfica 42.** Los resultados muestran la reducción hasta el 33% en calefacción y hasta el 78% en refrigeración, con respecto al SCO, sumando un total de 24,944 kWh anual, considerando el coeficiente de ocupación, **Tabla 49.**



Gráfica 42. Energía térmica anual total para climatización de espacios.

En cuanto a la temperatura operativa que se logró en cada uno de los sistemas constructivos, se puede apreciar que el comportamiento de REXT y REXT-INT es muy similar al del SCO. Solo en los meses calientes de mayo a agosto se percibe un beneficio en estos sistemas diferente al SCO, **Gráfica 43**.

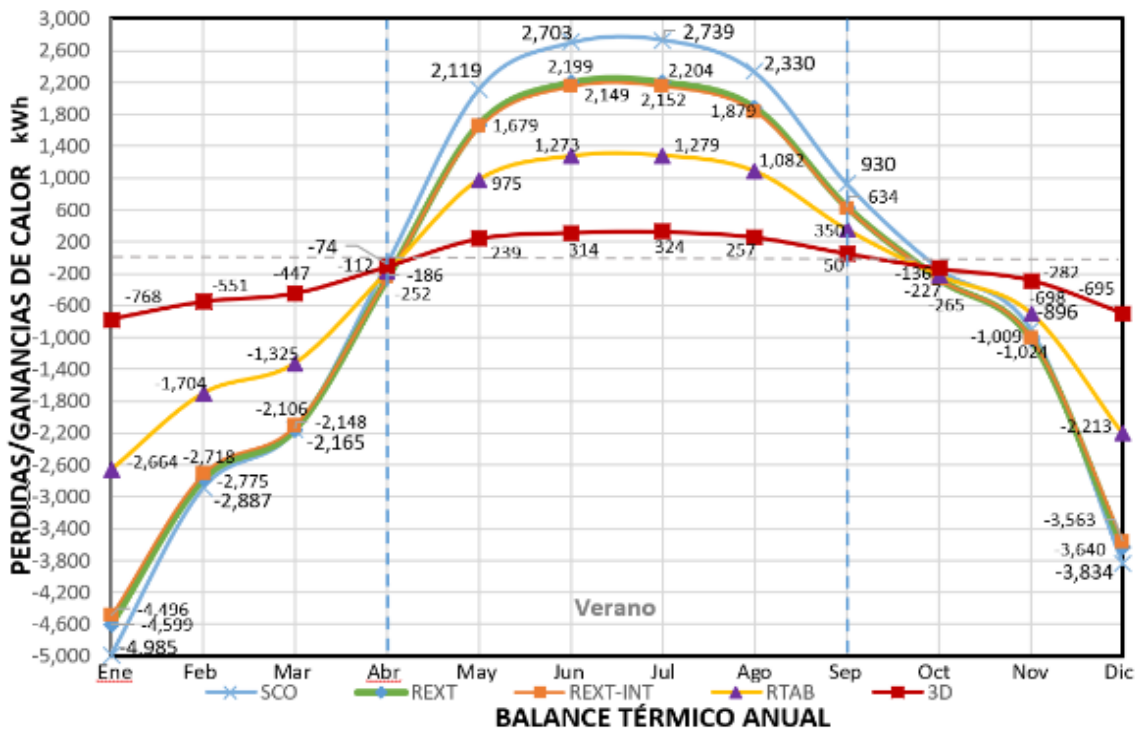
Es evidente, mediante esta simulación, que el sistema 3D es el que alcanza promedios más aceptables de confort, sobre todo durante los meses que integran el invierno cuando se presentan promedios de temperaturas operativas que van desde los 20 hasta los 26°C; por lo tanto, en zona de confort del 80% de aceptabilidad, **Gráfica 43**.



Gráfica 43. Temperatura operativa en Área social (Modo mecánico).

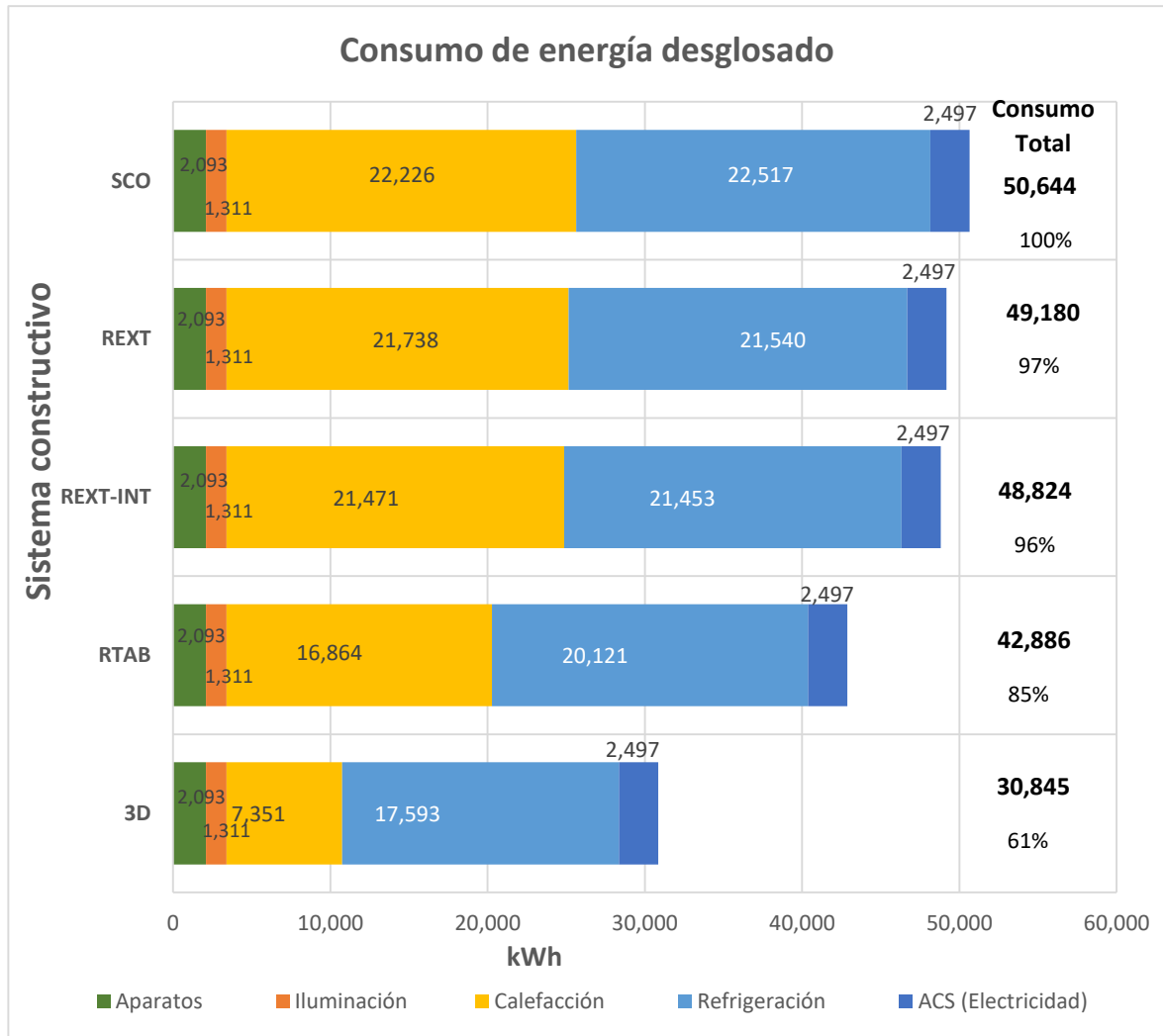
Con la propuesta 3D las temperaturas durante el invierno se incrementan con mayor eficiencia más que en los otros sistemas, comportamiento que, además, se presenta durante el verano, cuando la temperatura operativa disminuye en los meses de abril, mayo y septiembre, sin sobrepasar los 27°C, pero en junio, julio y agosto, con promedios de 27.44 a 27.52°C menores que cualquier otro sistema, pero aún más arriba de la zona de confort, **Grafica 43**.

En la simulación del balance térmico de muros, se muestra que los sistemas que componen los diferentes niveles de aislamiento obtienen beneficios, sobre todo durante el verano, en comparación con el SCO, siendo el 3D de mayor eficiencia, con menores pérdidas de calor durante el invierno y menos ganancias durante el verano, presentando una curva más lineal y cercana al balance térmico, **Gráfica 44**.



Gráfica 44. Pérdidas y ganancias de calor en muros (Modo mecánico).

En cuanto a la energía consumida durante el 2021 en el sistema SCO, se estima un gasto de 50,644 kWh, reduciéndose a un 61% en el 3D, con gastos de calefacción de 7,351 y 17,593 para enfriamiento, **Gráfica 45**.



Gráfica 45. Consumo total de energía (Modo mecánico).

Para determinar la eficiencia de los sistemas constructivos de aislamiento térmico evaluados, se compararon con estándares determinados en algunas normativas, además que fue necesario calcular el índice de prestación energética por factor de superficie, que permite llegar a la conclusión de que las cargas de

energía en los sistemas SCO, REXT, REXT-INT y RTAB, tienen un consumo común, pero por arriba del promedio mundial de energía anual de edificios señalado en 170 kWh/m² y arriba también del promedio de 120 kWh/m² para edificios ubicados en clima extremo o cálido seco [224][225] , **Tabla 50**.

En cuanto al índice de prestación energética por factor de superficie del sistema 3D, está por debajo del promedio de energía anual para edificios y del límite de 160 kWh/m² que lo sitúa en la clasificación de consumo bajo, con 145 kWh/m² [226], **Tabla 50**.

Tabla 50. Cálculo de prestación energética por factor de superficie.

	Consumo total anual	Área de construcción	Índice de prestación energética por factor de superficie
	kWh	m ²	kWh/m ²
SCO	50,644	212.1	239
REXT	49,180	212.1	232
REXT-INT	48,824	212.1	230
RTAB	42,886	212.1	202
3D	30,845	212.1	145
Promedio mundial de energía anual de edificios			170 *
Consumo alto			>300 **
Común			160 - 300 **
Bajo			<160 **
Ultrabajo			50 **
Promedio edificios clima extremo cálido seco			120 ***
Certificado de vivienda pasiva en Europa			15 *
* International Energy Agency			
** Butler (2008)			
*** Calderon (2011)			

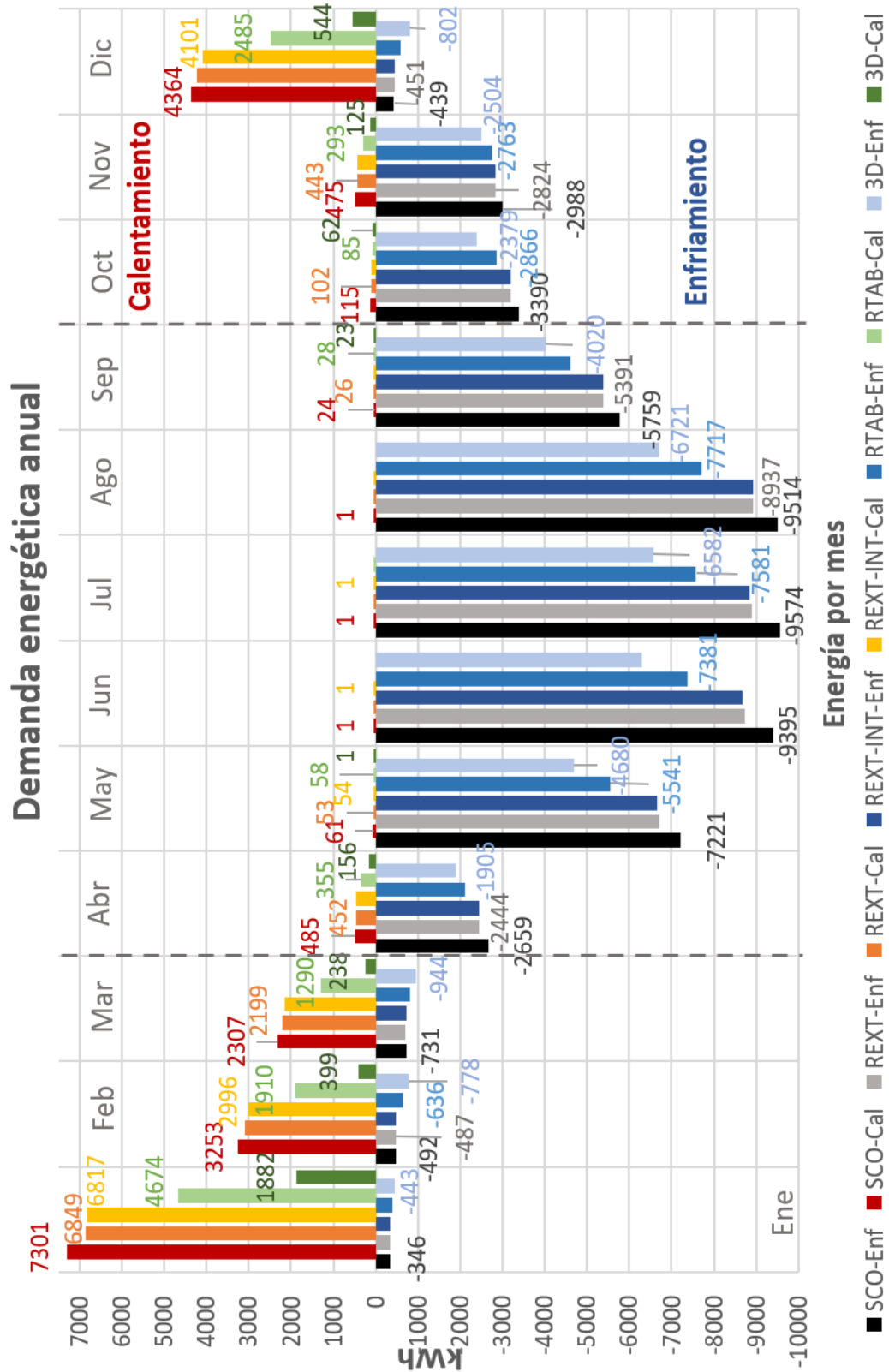
4.6.4 Simulación en modo mixto.

El comportamiento del SCO muestra que requiere mayor energía para enfriamiento y no sólo en los meses de verano, sino en algunos del invierno. El sistema sin aislamiento presenta consumos de energía hasta de 9,574 kWh en el mes de julio 2021, mientras que el mes donde se requiere mayor calentamiento es enero con 7,301 kWh, **Gráfica 46**.

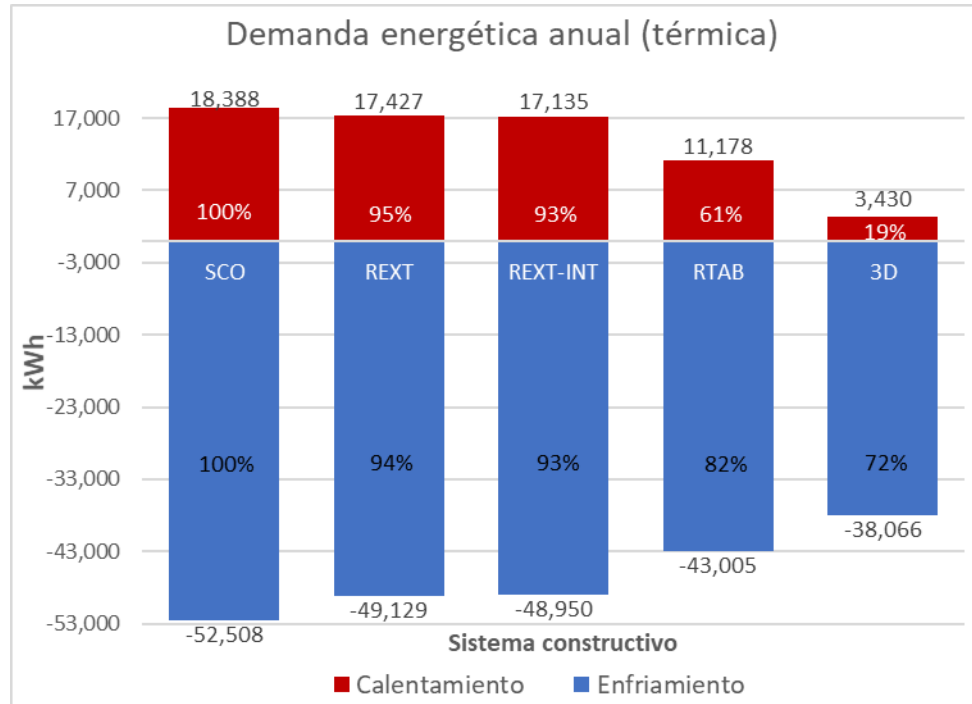
La tendencia en los otros sistemas es la misma, el REXT y REXT-INT presentan casi los mismos comportamientos, con una demanda de 17,427 y 17,135 kWh para calefacción, un 5 y 7% menos con respecto al SCO, además 49,129 y 48,950 kWh, 6 y 7% menos para refrigeración **Gráfica 47**, obteniendo mayor eficiencia que en las simulaciones anteriores, ya que reducen del 5 a 7% de la demanda de energía térmica anual, **Tabla 51**.

Nuevamente, los sistemas RTAB y 3D son los de mayor beneficio, estimando ahorros de energía del 39 y el 81% para calefacción, y del 18 al 28% para refrigeración, respectivamente, **Gráfica 47**. Los consumos totales anuales, considerando el factor CoP, son de 29,622 y 19,038 kWh, un 29 y un 54% menos, en comparación con el 41,434 kWh del SCO, **Tabla 51** y **Gráfica 48**.

La temperatura operativa del espacio evaluado (área social), se ve beneficiada con la utilización de los sistemas RTAB y 3D. En este último consiguiendo temperaturas dentro del intervalo de confort, con aceptación del 90% durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre, mientras en los meses restantes del año se logran temperaturas dentro del límite de aceptación del 80%, a diferencia de los otros sistemas evaluados, **Gráfica 49**.



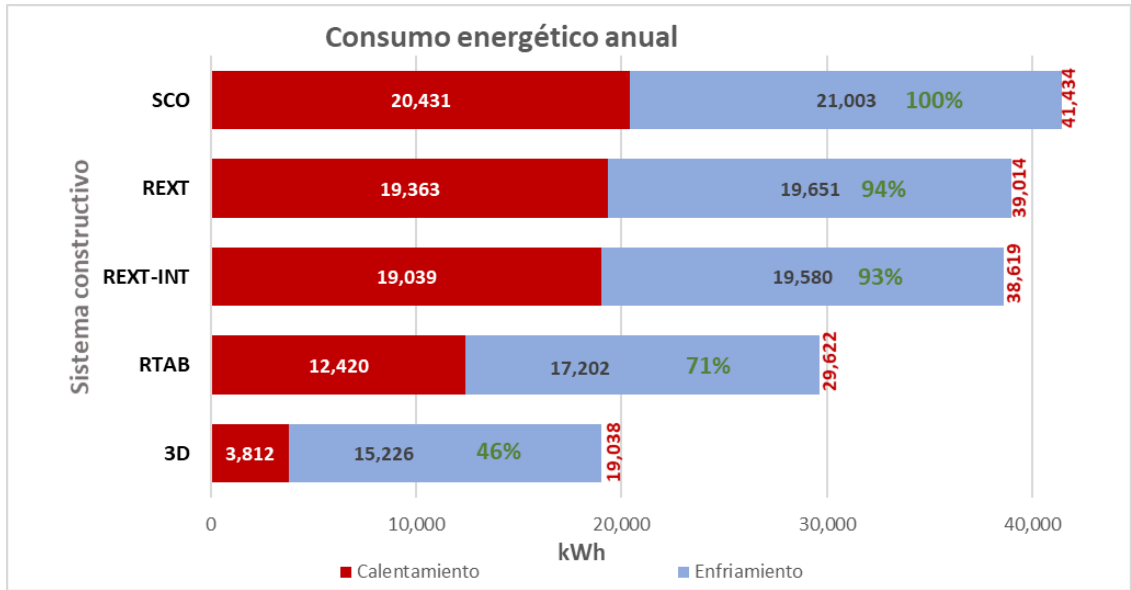
Gráfica 46. Demanda anual de energía para enfriamiento y calentamiento de espacios (modo Mixto).



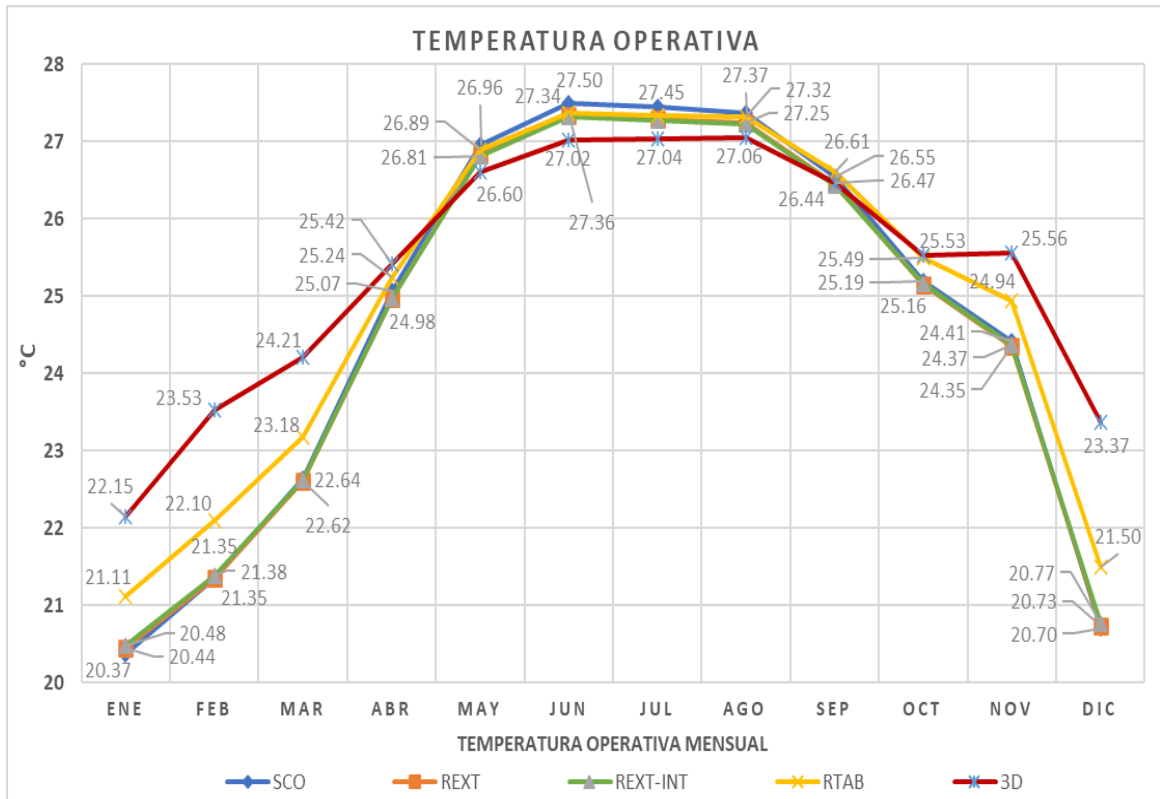
Gráfica 47. Energía térmica anual para climatización de espacios (modo mixto).

Tabla 51. Cálculo del consumo total de energía por medio del método HVAC simple (kWh).

Consumo energía térmica climatización					
	SCO	REXT	REXT-INT	RTAB	3D
Calefacción	18,388	17,427	17,135	11,178	3,430
Enfriamiento	52,508	49,129	48,950	43,005	38,066
	70,896	66,556	66,085	54,183	41,496
Consumo con coeficiente de desempeño estacional (CoP) Método HVAC Simple					
	SCO	REXT	REXT-INT	RTAB	3D
Calefacción / 0.90	20,431	19,363	19,039	12,420	3,812
Enfriamiento / 2.5	21,003	19,652	19,580	17,202	15,226
	41,434	39,015	38,619	29,622	19,038

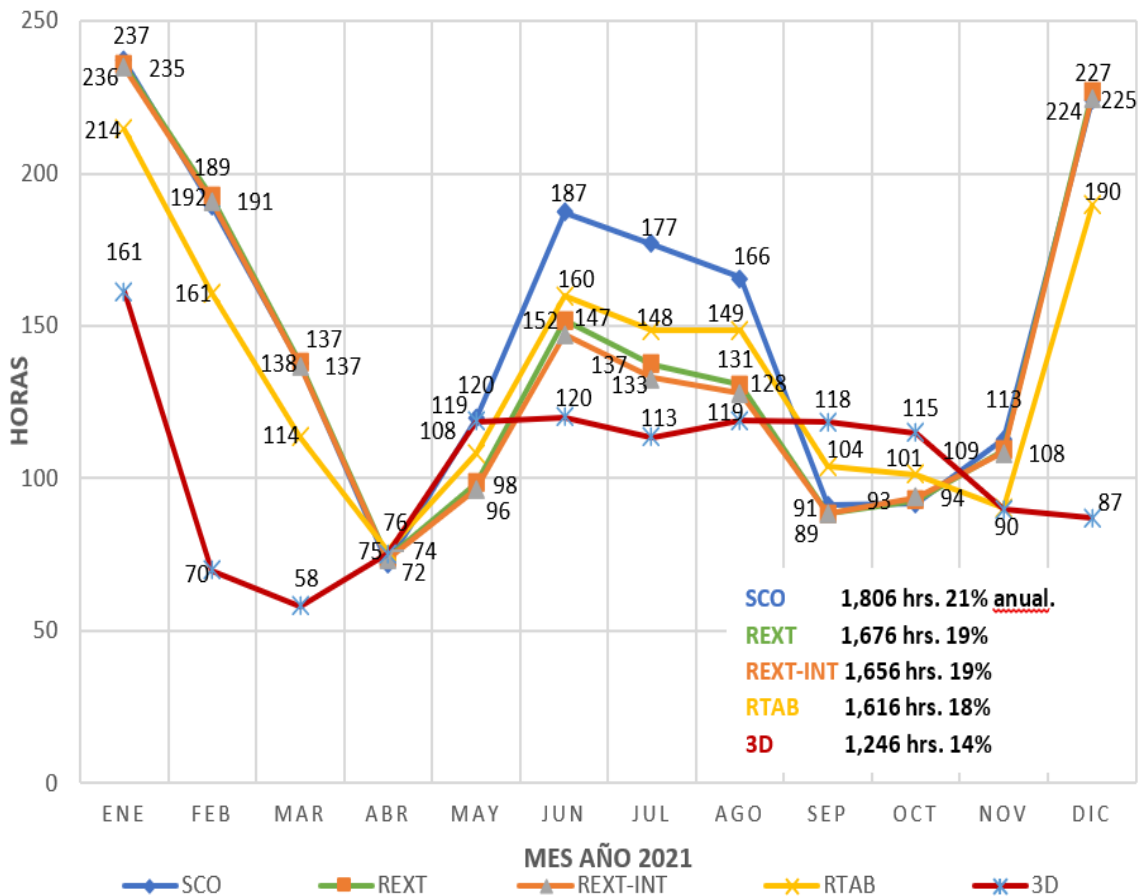


Gráfica 48. Energía térmica anual total para climatización de espacios (modo mixto).



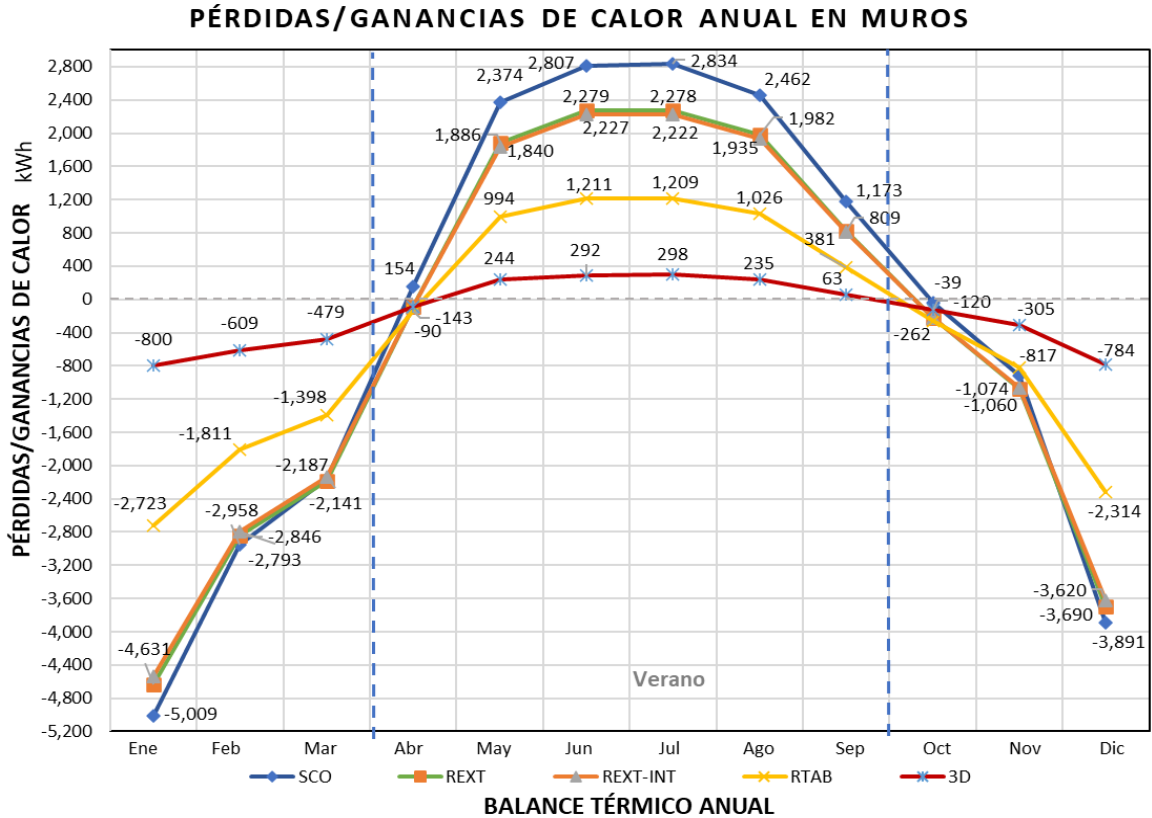
Gráfica 49. Condiciones de temperatura operativa anual (modo mixto).

Con la simulación se muestra que el SCO alcanza el mayor número de horas en discomfort, sumando 1,806 hr que representan el 21% anual, mientras con la eficiencia del 3D se consigue el 14% con, 1,246 hr en discomfort, presentando considerables reducciones en horas durante los meses de verano, pero en mayor proporción durante el invierno, **Gráfica 50**.



Gráfica 50. Horas en discomfort anual (modo mixto).

El balance energético en modo mixto hace evidente la eficiencia térmica de los muros, con la aplicación del mortero aislante, sobre todo con el sistema 3D, que reduce la pérdida de calor durante el invierno hasta 800 kWh, y ganancias en verano hasta 298 kWh, **Gráfica 51**.



Gráfica 51. Balance térmico en muros (modo mixto).

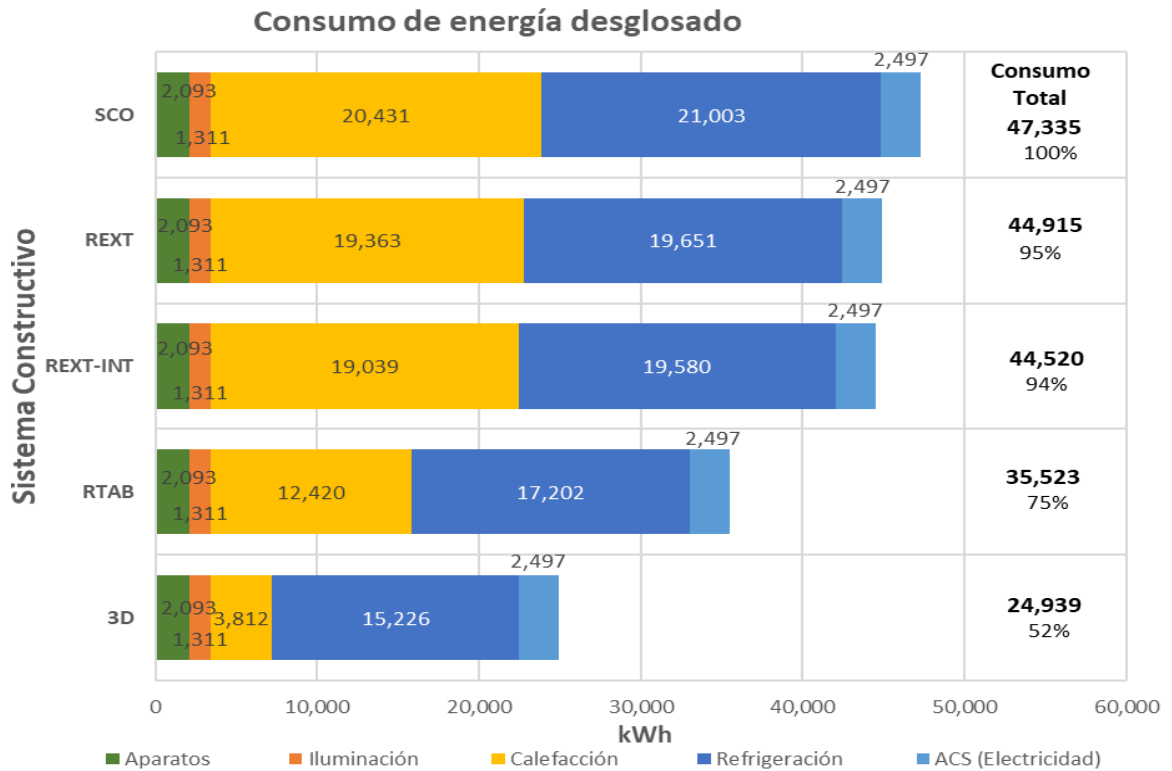
La simulación de la energía necesaria para la vivienda, considerando aparatos eléctricos, iluminación, agua caliente para saneamiento, calefacción y refrigeración, se estima en 47,335 kWh durante todo el año en el sistema SCO, reduciéndose en un 5 y un 6% con REXT y REXT-INT. Las propuestas RTAB y 3D son las más eficientes, reduciendo la energía en un 25 al 48%, respectivamente, en el último llegando a obtener un consumo de 24,939 kWh,

Gráfica 52.

La energía destinada a la climatización de los espacios se ve beneficiada sobre todo en la calefacción. En el SCO consume casi el mismo porcentaje que la energía para refrigeración con un 43 y 44%. Esta proporción se ve disminuida en la calefacción, al construir con los sistemas sobre todo más eficientes. En el

RTAB, con 35 y un 48% y en 3D con el 15 y el 61%, 3,812 y 15,226 kWh, **Gráfica**

52.



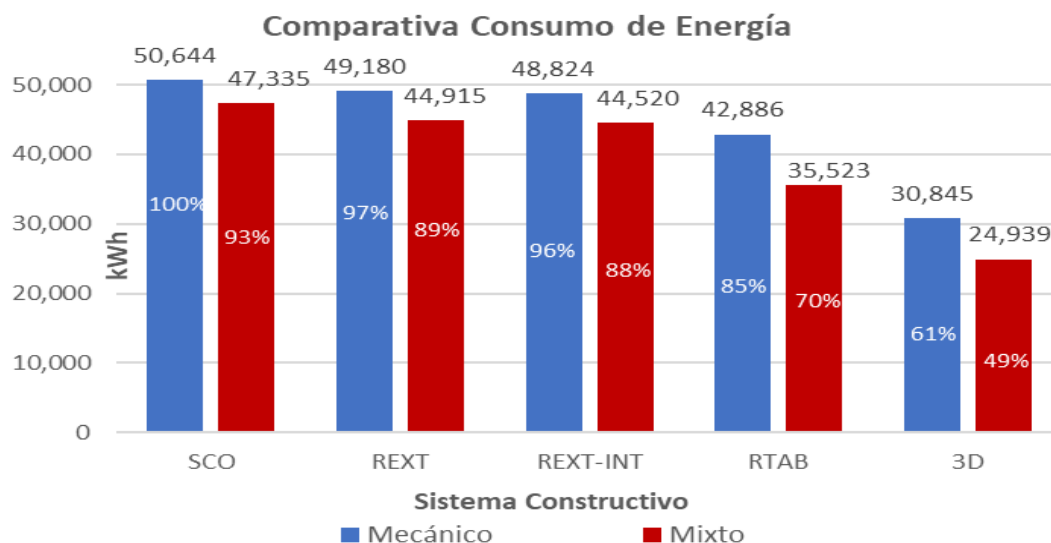
Gráfica 52. Estimación de energía consumida (modo mixto).

El SCO con funcionamiento mixto tiene un consumo de energía anual referenciado con el factor de superficie de 223 kWh/m², considerándose como consumo común, pero por arriba del porcentaje del promedio anual, al igual que el REXT y REXT-INT con 212 y 210 kWh/m². La propuesta 3D alcanza 118 kWh/m², dentro de los parámetros de consumo bajo, y también por debajo del promedio mundial de energía anual de edificios y del promedio de consumo para edificios de clima extremo cálido seco, 170 y 120 kWh/m², **Tabla 52.**

Tabla 52. Comparación de consumo de energía anual por factor de superficie.

	Consumo total anual	Área de construcción	Índice de prestación energética por factor de superficie
	kWh	m ²	kWh/m ²
SCO	47,335	212.1	223
REXT	44,915	212.1	212
REXT-INT	44,520	212.1	210
RTAB	35,523	212.1	167
3D	24,939	212.1	118
Promedio mundial de energía anual de edificios			170 *
Consumo alto			>300 **
Común			160 - 300 **
Bajo			<160 **
Ultrabajo			50 **
Promedio edificios clima extremoso cálido seco			120 ***
Certificado de vivienda pasiva en Europa			15 *
* International Energy Agency			
** Butler (2008)			
*** Calderon (2011)			

Con todos los resultados de las simulaciones se puede apreciar que el funcionamiento de la vivienda en modo mixto ahorra mayor energía hasta un 15% comparado con el funcionamiento mecánico, de 50,644 kWh en SCO a 24,939 kWh en el 3D mixto, reduciéndose un 51%, **Gráfica 53.**



Gráfica 53. Comparación del consumo de energía en funcionamiento mecánico y mixto.

Considerando la tarifa básica para el SCO en modo mecánico, el costo de la energía requerida anualmente sería de \$40,819.06 y para el 3D en modo mixto de \$20,100.83. El costo de energía sólo para climatizar en el sistema 3D en modo mixto sería anualmente de \$15,344.63 un 46% que el SCO, **Tabla 53**.

Tabla 53. Cálculo de costos empleados para funcionamiento mecánico y mixto.

Consumo de energía total.						
Sistema	Funcionamiento Mecánico			Funcionamiento Mixto		
	Consumo energía kWh	Tarifa Básica	Costo total	Consumo eléctrico kWh	Tarifa Básica	Costo total
SCO	50,644.00	0.81	\$40,819.06	47,335.00	0.81	\$38,152.01
REXT	49,180.00	0.81	\$39,639.08	44,915.00	0.81	\$36,201.49
REXT-INT	48,824.00	0.81	\$39,352.14	44,520.00	0.81	\$35,883.12
RTAB	42,886.00	0.81	\$34,566.12	35,523.00	0.81	\$28,631.54
3D	30,845.00	0.81	\$24,861.07	24,939.00	0.81	\$20,100.83
Consumo de energía para climatización						
Sistema	Funcionamiento Mecánico			Funcionamiento Mixto		
	Consumo energía kWh	Tarifa Básica	Costo total	Consumo energía kWh	Tarifa Básica	Costo total
SCO	44,743.00	0.81	\$36,062.86	41,424.00	0.81	\$33,387.74
REXT	43,278.00	0.81	\$34,882.07	39,014.00	0.81	\$31,445.28
REXT-INT	42,924.00	0.81	\$34,596.74	38,619.00	0.81	\$31,126.91
RTAB	36,985.00	0.81	\$29,809.91	29,622.00	0.81	\$23,875.33
3D	24,944.00	0.81	\$20,104.86	19,038.00	0.81	\$15,344.63
Consumo de energía para climatización en vivienda en Torreón						
		3,557.98	\$21,347.88	Subsidio	\$2,063.63	\$12,381.77
		bimestral	anual	42%	bimestral	anual

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Obj. 1.- El agregado AS disminuye la resistencia mecánica del mortero, ya que genera desprendimiento en las interfases de los materiales y provoca un efecto de baja compatibilización que se atribuye a su condición hidrofóbica. El tamaño de partícula más pequeño A3100 de 83,68 μm de diámetro, logra una buena dispersión en el compuesto, que junto con los aditivos se obtiene una resistencia superior al tamaño de partícula más pequeño de la MC.

En cuanto a la determinación de la dosificación del AS, las proporciones que mostraron mejores resultados son la 50, 65 y 80%, con respecto al volumen de los cementantes. Se descartan las muestras del 30% por su respuesta térmica presentando la más alta conductividad hasta un 49% más que las muestras A80, esto debido a que es la proporción que contiene menor cantidad de AS.

Con respecto al comportamiento mecánico, se descarta la proporción A100, ya que sólo alcanza 0.86 MPa a los 28 días, por debajo de la normativa para morteros con una resistencia a la compresión, apenas del 10% de la MC y 27% respecto a la A80.

Obj. 2.- Se destaca la eficacia del COP, que consigue compuestos con menor porosidad, más homogeneidad y más estabilidad, con superficies más densas, de mayor tamaño y sin fisuras. El COP logra una conductividad térmica más baja que el S, que genera macroporos que alcanzan las 5 μm y produce morteros que transfieren más calor.

La composición mineral resultante del proceso de hidratación después de 28 días de curado muestra que los contenidos de anhidrita, yeso y carbonato de calcio benefician la propiedad mecánica y aumentan la conductividad del material, propiedad que se ve afectada cuando en las muestras se integra el silano para modificación de aerogel.

El sistema que está compuesto por 80% de AS respecto al volumen de materiales cementantes y el 5% de COP respecto al volumen de agua de la mezcla, logra una resistencia a la compresión de 13.35 MPa a los 56 días, la cual es suficiente para emplearse de diferentes maneras en la construcción, como se establece en la norma ASTM 270 para morteros de yeso calcinado y bloques no estructurales de la norma ASTM C129. Además, el material consigue una baja conductividad de 0,34 W/mK, lo que le confiere al mortero características aislantes.

El COP produce un efecto positivo en el proceso de hidratación, sugiriendo que a diferentes edades se generan variaciones en los óxidos elementales que componen la muestra MC-80A-5. Las reacciones ocurren principalmente en óxido de Calcio, sulfato y óxido de Aluminio, los cuales se reducen en un 43, 33 y 12%, respectivamente, de 3 a 90 días. Existe un fenómeno en el que estos componentes químicos liberan átomos durante la reacción y pierden su presencia. Este fenómeno difiere del óxido de Silicio, que aumenta su concentración de 27 a 70%, lo que indica que se ha producido una reacción de hidratación adecuada.

Obj. 3.- El resultado del estudio del comportamiento térmico del mortero aplicado en el sistema de impresión 3D, presenta las mejores propiedades con una resistencia o valor “R” de 4.385 m²K/W, sobrepasando el parámetro mínimo de 1.00, 1.80 para espacios habitables y 2.10 para ahorro de energía, de acuerdo con la zona geográfica, además de una transmisión térmica o valor “U” de 0.229 W/m²K que lo hace más efectivo, consiguiendo reducir 3% la temperatura operativa de los espacios hasta 2°C menos con respecto al SCO, incrementando así el 9% de horas en confort anualmente.

La simulación del balance térmico determina que el 3D reduce 4% las pérdidas y ganancias de calor en los muros, presentando los valores más cercanos al balance “cero”, en comparación con los otros sistemas constructivos estudiados.

Obj. 4.- Con las simulaciones se establece que el sistema 3D reduce la demanda de energía térmica necesaria para el confort de espacios de un 42 a un 44%, sobre todo para calentamiento, porcentajes dentro del intervalo del 35 al 47% establecido para un aislamiento óptimo. Por consiguiente, disminuye el consumo energético anual hasta un 51% para climatización, logrando que la vivienda tenga un consumo bajo de energía, por debajo del promedio anual y del consumo de edificios en clima extremoso cálido seco, con 118 kWh/m², que, de acuerdo con una tarifa básica, se tendría un ahorro del 54% que representa un costo de \$18,043 (2022) anuales, en una región desértica como la de Torreón, Coahuila.

Recomendación.

En este estudio se planteó obtener un mortero que ayudara a la eficiencia energética de las construcciones, pero se recomienda el estudio de algunas pastas que se encontraron en la primera etapa de la investigación. Estos compuestos presentaron excelentes propiedades térmicas, debajo de las obtenidas por los morteros, demostrándose que el empleo de arena incrementa la conductividad de los compuestos; por lo tanto, estas pastas empleadas en la impresión 3D pudieran obtener un ahorro energético mayor.

De esta investigación se tiene publicado el artículo “***Effects on the mechanical and thermal behaviors of an alternative mortar when adding modified silica aerogel with aminopropyl triethoxysilane and PEG–PPG–PEG triblock copolymer additives***” (a continuación, se anexa artículo).



Effects on the Mechanical and Thermal Behaviors of an Alternative Mortar when Adding Modified Silica Aerogel with Aminopropyl Triethoxysilane and PEG-PPG-PEG Triblock Copolymer Additives

R. Valdez-Cano¹ · J. R. González-López¹ · M. A. Guerra-Cossío¹

Received: 17 January 2023 / Accepted: 30 March 2023
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature B.V 2023

Abstract

The incorporation of silica aerogel (SA) aggregates with different granulometry and surface modifications with two additives are evaluated to determine the effects that occur on the mechanical and thermal properties of an alternative mortar (MC). The results are obtained through physical, mechanical, thermal and microstructural analyses, demonstrating that the incorporation of small SA and high-density A3100 favors thermal and mechanical behaviors, reaching a conductivity of 0.111 W/mK in paste and 0.312 W/mK in mortar. Thus, reductions of 31% relative to the sample composed of only MC and of 26% relative to the sample with the largest A1000 particle size are achieved. The superficial modification of the SA with the two additives benefits the resistance of the compound, increasing adherence and minimizing the cracking and separation caused by the poor compatibility of the aerogel surrounding the particles in the interfaces between materials. The copolymer (COP) in a 5% dosage with the SA A3100 aggregate in a proportion of 80% increases the calcium and silicon contents, producing a homogeneous, large and dense compound with few cavities and fissures. The dosage increases the resistance relative to the samples without SA; the strength values reach 13.35 MPa at 56 days, becoming the most viable option for modifying the SA surface and improving the behaviors in the MC. This sample differs from triethoxysilane (S), which generates surfaces with macropores and separation distances reaching 5 μm improving its ability to conduct heat.

Keywords Silica aerogel · Surface modification · Alternative mortar · Thermal conductivity · Mechanical strength

1 Introduction

SA is a next generation material that greatly benefits the environment due to energy savings and a positive energy balance when used in construction materials [1]. The presence of SA in the form of granules or particles facilitates its inclusion in pastes, mortars, and concretes, provoking interest in determining its influences on the thermal, mechanical and acoustic properties of the compounds [2–4].

The thermal insulation achieved by SA makes it one of the most promising materials in terms of energy savings in buildings [2, 5, 6], reaching the lowest documented thermal conductivity for solid materials at 0.012 W/mK and, in some

cases, at 0.008 W/mK; this value is below the limit range of 0.02 W/mK established by Koebel et al. in 2012 for super-insulating materials [2, 3, 5–7]. SA has been reported to decrease thermal conductivity by up to 92%, from 0.7 W/mK to 0.05 W/mK; these values depend on the included volume of this aggregate in the compounds [2].

When SA is incorporated into a cementitious matrix, it partially reduces the compressive strength and causes weaknesses in the materials; thus, the material does not comply with the requirements and regulations that limit their application in construction [4, 8–11]. This effect is caused by the hydrophobic condition of a surface that repels the liquid parts of mixtures, thus preventing adequate reactions, causing fissures, causing contractions, and creating inclusions of air that negatively affect the interface zone (solid phase of SA and liquid phase of the compound), decreasing the compatibility [4, 9, 12].

To solve this problem, it is recommended to use additives that, through a chemical process and coupling agents, such as silane suspension (S), or amphiphilic materials, such as

✉ R. Valdez-Cano
ricardovac05@hotmail.com

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mexico

Referencias bibliográficas

- [1] Organización de las Naciones Unidas, (2018), “Departamento de Asuntos Económicos y Sociales,” <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>, May 16, 2018.
- [2] IEA and UNEP, (2018), “International Energy Agency and the United Nations Environment Programme - Global Status Report 2018: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector,” *Global Status Report*, p. 325, doi: 978-3-9818911-3-3.
- [3] D. Sanz-Pont, D. Sanz-Arauz, C. Bedoya-Frutos, R. J. Flatt, and S. López-Andrés, (2016), “Anhydrite/aerogel composites for thermal insulation,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 49, no. 9, pp. 3647–3661, doi: 10.1617/s11527-015-0746-8.
- [4] U. Berardi, (2017), “The benefits of using aerogel-enhanced systems in building retrofits,” *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 626–635, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.576.
- [5] M. G. Gomes, I. Flores-Colen, F. da Silva, and M. Pedroso, (2018), “Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods,” *Constr Build Mater*, vol. 172, pp. 696–705, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.162.
- [6] M. Aegerter, N. Leventis, and M. Koebel, (2011), *Aerogels handbook (Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies)*. doi: 10.1007/978-1-4614-1957-0.
- [7] L. Wang *et al.*, (2018), “Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel,” *Constr Build Mater*, vol. 188, pp. 747–757, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.054.
- [8] P. Zhu *et al.*, (2019), “Study of physical properties and microstructure of aerogel- cement mortars for improving the fire safety of high- performance concrete linings in tunnels,” *Cem Concr Compos*, p. 103414, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103414.
- [9] “BREEAM evalúa 10 Medidas para reducir las emisiones de CO2,” *Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM)*, (2019). <http://www.breeam.es/comunicacion/noticias/repasamos-10-medidas-que-evalua-breeam-para-reducir-las-emisiones-de-co2>. [Último acceso: 02 octubre 2019]. (accessed oct. 01, 2019).
- [10] “Growing Buildings, Construcción y emisiones CO2 a la atmósfera,” *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*, (2019). <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>. (accessed oct. 03, 2019).

-
- [11] Organización de las Naciones Unidas, (2016), “PNUMA urge acortar un 25% adicional las emisiones contaminantes para 2030,” *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. <http://www.inu.mx/noticias/la/pnuma-urge-a-cortar-un-25-adic/>. (accessed Sep. 24, 2019).
- [12] “Construcción y emisiones de CO₂ a la atmósfera,” *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>. (accessed Oct. 02, 2019).
- [13] “Energy Efficiency: Buildings,” *International Energy Agency*, (2019). <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/>. (accessed Sep. 23, 2019).
- [14] “Acuerdo sobre el cambio climático de las Naciones Unidas, Acción por el clima.,” 2015.
- [15] *Global Waste Management Outlook*. (2016). doi: 10.18356/765baec0-en.
- [16] Kusch-Brandt, *Urban Renewable Energy on the Upswing: A Spotlight on Renewable Energy in Cities in REN21's, 2019, “Renewables 2019 Global Status Report,”* vol. 8, no. 3. 2019. doi: 10.3390/resources8030139.
- [17] O. de las N. U. para el M. A. (2018), (PNUMA), “No Title,” *Hace falta un cambio radical para construir edificios más ecológicos*, <https://news.un.org/es/story/2018/12/1447561>. (accessed Sep. 22, 2019).
- [18] J. Tian, S. Shafi, H. Tan, and Y. Zhao, (2020), “Mechanical and thermal-insulating performance of silica aerogel enhanced jointly with glass fiber and fumed silica by a facile compressing technique,” *Chem Phys Lett*, vol. 739, no. November, doi: 10.1016/j.cplett.2019.136950.
- [19] M. Aegerter, N. Leventis, and M. Koebel, (2011), *Aerogels handbook (Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies)*. doi: 10.1007/978-1-4614-1957-0.
- [20] A. Parvathy Rao and A. Venkateswara Rao, (2010), “Modifying the surface energy and hydrophobicity of the low-density silica aerogels through the use of combinations of surface-modification agents,” *J Mater Sci*, vol. 45, no. 1, pp. 51–63, doi: 10.1007/s10853-009-3888-7.
- [21] S. A. Mahadik, F. Pedraza, V. G. Parale, and H. Park, (2016), “Organically modified silica aerogel with different functional silylating agents and effect on their physico-chemical properties,” *J Non Cryst Solids*, vol. 453, pp. 164–171, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2016.08.035.
- [22] S. Li, H. Ren, J. Zhu, Y. Bi, Y. Xu, and L. Zhang, (2017), “Facile fabrication of superhydrophobic, mechanically strong multifunctional silica-based aerogels at benign temperature,” *J Non Cryst Solids*, vol. 473, no. July, pp. 59–63, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.07.032.
- [23] P. Ruckdeschel, A. Philipp, and M. Retsch, (2017), “Understanding Thermal Insulation in Porous, Particulate Materials,” *Adv Funct Mater*, vol. 27, no. 38, pp. 1–11, doi: 10.1002/adfm.201702256.
-

-
- [24] S. Fickler, B. Milow, L. Ratke, M. Schnellenbach-Held, and T. Welsch, (2015) "Development of high-performance aerogel concrete," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 406–411, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.684.
- [25] D. Sanz-Pont, (2016) "Comportamiento térmico y mecánico del yeso con adiciones de aerogel de sílice granulado," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [26] V. G. Parale, D. B. Mahadik, S. A. Mahadik, M. S. Kavale, A. Venkateswara Rao, and P. B. Wagh, (2012) "Wettability study of surface modified silica aerogels with different silylating agents," *J Solgel Sci Technol*, vol. 63, no. 3, pp. 573–579, doi: 10.1007/s10971-012-2788-5.
- [27] M. A. Guerra-Cossío, (2016) "Efecto de la temperatura de calcinación sobre la reactividad de cementantes hidráulicos a base de yeso de desecho.,".
- [28] American Society of Testing and Materials (ASTM), "ASTM 270 Standard specification form mortar form unit masonry.," vol. 04.05.
- [29] UNE-EN, 2012, *Specification for masonry Mortar*.
- [30] G. Feng, S. Sha, and X. Xu, (2016), "Analysis of the Building Envelope Influence to Building Energy Consumption in the Cold Regions," *Procedia Eng*, vol. 146, pp. 244–250, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.382.
- [31] T. Zhang and H. Yang, (2019), "Heat transfer pattern judgment and thermal performance enhancement of insulation air layers in building envelopes," *Appl Energy*, vol. 250, no. January, pp. 834–845, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.05.070.
- [32] S. Liu, K. Zhu, S. Cui, X. Shen, and G. Tan, (2018), "A novel building material with low thermal conductivity: Rapid synthesis of foam concrete reinforced silica aerogel and energy performance simulation," *Energy Build*, vol. 177, pp. 385–393, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.014.
- [33] J. Hu and X. Yu, (2019), "Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions," *Solar Energy*, vol. 193, no. August, pp. 866–877, doi: 10.1016/j.solener.2019.10.021.
- [34] M. Oge, D. Ozkan, M. B. Celik, M. Sabri Gok, and A. Cahit Karaoglanli, (2019), "An Overview of Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slag in Various Applications," *Mater Today Proc*, vol. 11, pp. 516–525, doi: 10.1016/j.matpr.2019.01.023.
- [35] P. C. Aitcin, (2008) *Binders for durable and sustainable concrete*. London and New York.
- [36] P. C. Hewlett, (2006), "Chemistry of cement and concrete.," *Elsevier*.
- [37] I. Garcia Lodeiro, A. Fernandez Jimenez, and A. Palomo, (2015), "Revista ALCONPAT," ... *Alconpat*, pp. 41–51, [Online]. Available: [http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/Revista ALCONPAT, Volumen 1, Numero 1, enero-abril 2011/Revista ALCONPAT, Volumen 1, Numero 1, enero-Abril 2011.pdf](http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/Revista_ALCONPAT_Volumen_1_Numero_1_enero-abril_2011/Revista_ALCONPAT_Volumen_1_Numero_1_enero-Abril_2011.pdf)
-

-
- [38] L. Senff, D. Hotza, W. L. Repette, V. M. Ferreira, and J. A. Labrincha, (2010), "Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design," vol. 24, pp. 1432–1437, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.012.
- [39] M. C. G. Juenger, F. Winnefeld, J. L. Provis, and J. H. Ideker, (2011), "Cement and Concrete Research Advances in alternative cementitious binders," *Cem Concr Res*, vol. 41, no. 12, pp. 1232–1243, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
- [40] M. C. G. Juenger, F. Winnefeld, J. L. Provis, and J. H. Ideker, (2011), "Cement and Concrete Research Advances in alternative cementitious binders," *Cem Concr Res*, vol. 41, no. 12, pp. 1232–1243, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
- [41] R. Arroyo, (2019), "Lighweight structural eco-mortars made with polyuretano wastes and non-ionic surfactants," *Constr Build Mater*, vol. 197, pp. 157–163.
- [42] W. Jun, Y. Baoying, and G. Yuxin, (2014), "Hydration Characteristics of Super Sulphated Cement with Different Fineness," no. Icmaee, pp. 1–4.
- [43] C. Lanos, G. Samson, and C. Baux, "SUPER SULFATED CEMENT: FORMULATION AND USES".
- [44] A. Grandclerc, M. Guéguen-minerbe, I. Nour, P. Dangla, and T. Chaussadent, (2017), "Impact of cement composition on the adsorption of hydrogen sulphide and its subsequent oxidation onto cementitious material surfaces," vol. 152, pp. 576–586, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.003.
- [45] J. Calleja, (1982) "Escorias y cementos siderúrgicos".
- [46] J. Bizzozero and K. L. Scrivener, (2015), "Cement and Concrete Research Limestone reaction in calcium aluminate cement – calcium sulfate systems," *Cem Concr Res*, vol. 76, pp. 159–169, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.019.
- [47] N. Ukrainczyk and T. Matusinovi, (2010), "Cement and Concrete Research Thermal properties of hydrating calcium aluminate cement pastes," vol. 40, pp. 128–136, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.005.
- [48] N. Vrbos and T. Matusinovic, (2003), "Porosity – strength relation in calcium aluminate cement pastes," vol. 33, pp. 1801–1806, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00201-1.
- [49] R. Zentar, H. Wang, and D. Wang, (2021), "Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material," *Constr Build Mater*, vol. 279, p. 122447, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122447.
- [50] J. Zhang, G. Li, W. Ye, Y. Chang, Q. Liu, and Z. Song, (2018) "Effects of ordinary Portland cement on the early properties and hydration of calcium sulfoaluminate cement," *Constr Build Mater*, vol. 186, pp. 1144–1153, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.008.
-

-
- [51] N. Ukrainczyk, (2013), "Calcium Sulfoaluminate Eco-Cement from Industrial Waste," vol. 27, no. 1, pp. 83–93.
- [52] G. Li, J. Zhang, Z. Song, C. Shi, and A. Zhang, (2018), "Improvement of workability and early strength of calcium sulphoaluminate cement at various temperature by chemical admixtures," *Constr Build Mater*, vol. 160, pp. 427–439, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.076.
- [53] J. Page, F. Khadraoui, M. Gomina, and M. Boutouil, (2021), "Enhancement of the long-term mechanical performance of flax fiber-reinforced cementitious composites by using alternative binders," *Journal of Building Engineering*, vol. 40, no. September 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102323.
- [54] J. Ambroise and J. Pe, (2004), "New applications of calcium sulfoaluminate cement," vol. 34, pp. 671–676, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.10.019.
- [55] "Materiales aglutinantes o aglomerantes en la construcción," (2021). <http://e-construir.com/materiales/aglutinantes.html> (accessed Mar. 28, 2022).
- [56] A. Zahmak, M. Abdallah, B. Jarah, M. G. Arab, and F. Ash, (2021), "Transportation Geotechnics Environmental performance of alkali-activated binders for ground improvement," *Transportation Geotechnics*, vol. 31, no. August, p. 100631, doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100631.
- [57] M. Corrêa-Silva, M. Rouainia, T. Miranda, and N. Cristelo, (2020), "Predicting the mechanical behaviour of a sandy clay stabilised with an alkali-activated binder," *Eng Geol*, vol. 292, no. May 2020, doi: 10.1016/j.enggeo.2021.106260.
- [58] Metrar, (2020), "Metales alcalinos,". <https://metrar.com.ar/blog/que-son-los-metales-alcalinos/> (accessed Mar. 28, 2022).
- [59] Quimica.es, "Álcali," (2022). <https://www.quimica.es/enciclopedia/Álcali.html> (accessed Mar. 28, 2022).
- [60] B. Ababnet, Ayman; Matalkah, Faris; Matalkeh, (2022), "Effects of kaolin characteristics on the mechanical properties of alkali-activated binders," *Constr Build Mater*, vol. 318, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126020>.
- [61] J. Wang, T. Huang, L. Han, F. Xie, Z. Liu, and D. Wang, (2021), "Optimization of alkali-activated concrete based on the characteristics of binder systems," *Constr Build Mater*, vol. 300, p. 123952, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123952.
- [62] S. Specification, (2010), "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use," pp. 1–4, doi: 10.1520/C0618.
- [63] ASTM C1585-13, (2013), "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes," *ASTM International*, vol. 41, no. 147, pp. 1–6, doi: 10.1520/C1585-13.2.
-

-
- [64] H. Begliardo, M. Sánchez, M. C. Panigatti, and S. Garrappa, (2013), "Reutilización de yeso recuperado de construcciones: Un estudio basado en requisitos de aptitud de normas argentinas y chilenas," *Revista de la Construcción*, vol. 12, no. 3, pp. 27–35, doi: 10.4067/s0718-915x2013000300003.
- [65] M. del Río-Merino, A. Vidales-Barriguete, C. Piña-Ramírez, V. Vitiello, J. Santa Cruz-Astorqui, and R. Castelluccio, (2022), "A review of the research about gypsum mortars with waste aggregates," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103338, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103338.
- [66] M. Doleželová, L. Scheinherrová, J. Krejsová, M. Keppert, R. Černý, and A. Vimmrová, "Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers, (2021)," *Constr Build Mater*, vol. 297, p. 123791, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123791.
- [67] J. Krejsová, M. Doleželová, and A. Vimmrová, (2017), "Behavior of gypsum-based mortars with silica fume at high temperatures," p. 040022. doi: 10.1063/1.4994502.
- [68] ASTM, (2013), "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars," *ASTM Standards*, vol. 44, no. 0, pp. 1–8, doi: 10.1520/C0989.
- [69] A. M. Rashad, (2018), "An overview on rheology, mechanical properties and durability of high-volume slag used as a cement replacement in paste, mortar and concrete," *Constr Build Mater*, vol. 187, pp. 89–117, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.150.
- [70] J. I. Escalante-Garcia, L. J. Espinoza-Perez, A. Gorokhovskiy, and L. Y. Gomez-Zamorano, (2009), "Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement," *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 7, pp. 2511–2517, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.002.
- [71] S. T. Method, (2003), "ASTM C430 - Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement and Raw Materials by the," vol. 96, no. 50, pp. 7–9, doi: 10.1520/C0786.
- [72] A. Mehta and D. K. Ashish, (2019), "Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review," *Journal of Building Engineering*, no. March, p. 100888, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100888.
- [73] American Society of Testing and Materials, (2000), "ASTM C1240 – 05 Standard Specification for silica fume used in cementitious mixtures," *ASTM International*, vol. 4, no. 2, pp. 1–6, doi: 10.1520/C1240-05.2.
- [74] M. A. Guerra-Cossío, (2020), "Desarrollo de las propiedades térmicas de un material ligero aireado a base de anhidrita y escoria de alto horno.," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2020.
- [75] M. S. Al-Homoud, (2005), "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Build Environ*, vol. 40, no. 3, pp. 353–366, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
-

-
- [76] S. A. Al-Sanea and M. F. Zedan, (2011), "Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass," *Appl Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 3113–3124, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.02.036.
- [77] C. Wang, Y. Zhu, and X. Guo, (2019), "Thermally responsive coating on building heating and cooling energy efficiency and indoor comfort improvement," *Appl Energy*, vol. 253, no. February, p. 113506, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113506.
- [78] P. Westgate, K. Paine, and R. J. Ball, (2018), "Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres," *Constr Build Mater*, vol. 158, pp. 472–480, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.177.
- [79] C. Buratti, F. Merli, and E. Moretti, (2017), "Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance," *Energy Build*, vol. 152, pp. 472–482, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.071.
- [80] A. Lamy-mendes, A. Dora, R. Pontinha, P. Alves, P. Santos, and L. Durães, "Progress in silica aerogel-containing materials for buildings' thermal insulation, (2021)," *Constr Build Mater*, vol. 286, p. 122815, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122815.
- [81] K. Kalhor and N. Emaminejad, (2020), "Qualitative and quantitative optimization of thermal insulation materials: Insights from the market and energy codes," *Journal of Building Engineering*, vol. 30, no. July 2019, p. 101275, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101275.
- [82] M. Koebel, A. Rigacci, and P. Achard, (2012), "Aerogel-based thermal superinsulation: an overview," *J Solgel Sci Technol*, vol. 63, no. 3, pp. 315–339, doi: 10.1007/s10971-012-2792-9.
- [83] B. P. Jelle, (2011), "Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities," *Energy Build*, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [84] A. M. Domingo, (2011), "Apuntes de transmisión de calor," <https://oa.upm.es/16570/2/amd-apuntes-transmision-calor-v2.4.pdf> (accessed Apr. 23, 2020).
- [85] Afshin. Cendel, Yunus A.; Ghajar, (2011), *Transferencia de calor y masa*, 4 edición. Madrid, España.
- [86] H. D. Baehr and K. Stephan, (2011), *Heat and mass transfer: with many worked examples and exercises*. [Online]. Available: <https://aalto.finna.fi/Record/alli.555677>
- [87] M. Massoud, *Engineering Thermofluids*. (2005). doi: 10.1007/b138870.
- [88] T. Kobari, J. Okajima, A. Komiya, and S. Maruyama, (2015), "Development of guarded hot plate apparatus utilizing Peltier module for precise thermal conductivity measurement of insulation materials," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 91, pp. 1157–1166, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.044.
-

-
- [89] N. Soares, C. Martins, M. Gonçalves, P. Santos, L. S. da Silva, and J. J. Costa, (2019), "Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: A review," *Energy Build*, vol. 182, pp. 88–110, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.10.021.
- [90] C. González, J. Neila; Bedoya, (1997), *Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental 1*, Editorial. Madrid, España.
- [91] L. M. Sala Lizarraga, José María; López González, (2011), *Termodinámica Fundamental*, Tercera Ed.
- [92] J. A. Rodríguez, *Introducción a la termodinámica con algunas aplicaciones de Ingeniería*. [Online]. Available: <https://www.ier.unam.mx/~ojs/pub/Curso Mabe Termo/Introducción a la Termodinamica.pdf>
- [93] ONNCCE, (2009), "Industria de la construcción, aislamiento térmico-valor R para las envolventes de la vivienda por zona térmica para la República Mexicana- Especificaciones y verificación.," vol. NMX-C-460.
- [94] Mark. kreith, Frank; Manglik, RAJM; s. Bohn, (2012), *Principios de transferencia de calor*, Séptima ed.
- [95] G. de Ignacio Vivens, S. Soutullo Castro, O. López-Zaldivar, R. V. Lozano-Diez, and A. Verdú Vázquez, (2018), "Sobre inercia térmica y aislamiento de viviendas en clima cálido-húmedo = On thermal inertia and insulation of buildings in warm-humid climate," *Anales de Edificación*, vol. 4, no. 1, p. 14, doi: 10.20868/ade.2018.3730.
- [96] J. Alfredo. Barbosa Saldaña, Juan Gabriel; Gutiérrez Torres, Claudia del Carmen; Jiménez Bernal, (2015), *Termodinámica para ingenieros*, Primera Ed. Ciudad de México.
- [97] A. Aslani, A. Bakhtiar, and M. H. Akbarzadeh, (2019), "Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment," *Journal of Building Engineering*, vol. 21, no. March 2018, pp. 55–63, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.09.014.
- [98] J. Boschmonart-rives, X. Gabarrell, and J. Sierra-p, (2020), "Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions," vol. 113, no. 2016, pp. 102–113, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.090.
- [99] Normalización Española UNE, (2004), "Thermal insulation for building applications," .
- [100] J. Hu and X. Yu, (2019), "Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions," *Solar Energy*, vol. 193, no. August, pp. 866–877, doi: 10.1016/j.solener.2019.10.021.
- [101] S. A. Instituto Tecnológico de Canarias, (2008), *Energías renovables y eficiencia energética*, Canarias.
- [102] L. Yang, H. Yan, and J. C. Lam, (2014), "Thermal comfort and building energy consumption implications - A review," *Appl Energy*, vol. 115, pp. 164–173, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.10.062.
-

-
- [103] G. Salvalai, G. Masera, and M. M. Sesana, (2015), "Italian local codes for energy efficiency of buildings: Theoretical definition and experimental application to a residential case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1245–1259, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.038.
- [104] M. Bourdeau, X. Guo, and E. Nefzaoui, (2018), "Buildings energy consumption generation gap: A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings," *Energy Build*, vol. 159, no. 2018, pp. 600–611, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.062.
- [105] A. Krstić-Furundžić, M. Vujošević, and A. Petrovski, (2019), "Energy and environmental performance of the office building facade scenarios," *Energy*, vol. 183, pp. 437–447, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.231.
- [106] M. A. Aktacir, O. Büyükalaca, and T. Yilmaz, (2010), "A case study for influence of building thermal insulation on cooling load and air-conditioning system in the hot and humid regions," *Appl Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 599–607, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.05.008.
- [107] N. Nord, (2017), "Building Energy Efficiency in Cold Climates," *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, no. September, pp. 149–157, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10190-3.
- [108] M. Kucharek, W. MacRae, and L. Yang, (2020), "Investigation of the effects of silica aerogel particles on thermal and mechanical properties of epoxy composites," *Compos Part a Appl Sci Manuf*, vol. 139, no. May, p. 106108, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106108.
- [109] D. Kumar, M. Alam, P. X. W. Zou, J. G. Sanjayan, and R. A. Memon, (2020), "Comparative analysis of building insulation material properties and performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, no. July, p. 110038, doi: 10.1016/j.rser.2020.110038.
- [110] Y. Li and Y. Rezgui, (2017), "A novel concept to measure envelope thermal transmittance and air infiltration using a combined simulation and experimental approach," *Energy Build*, vol. 140, pp. 380–387, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.036.
- [111] B. Abu-Jdayil, A. H. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, and S. Hameedi, (2019), "Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview," *Constr Build Mater*, vol. 214, pp. 709–735, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102.
- [112] L. D. Hung Anh and Z. Pásztor, (2021), "An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, doi: 10.1016/j.job.2021.102604.
- [113] F. Asdrubali, F. D. Alessandro, and S. Schiavoni, (2020), "Sustainable Materials and Technologies A review of unconventional sustainable building insulation materials," *SUSMAT*, vol. 4, no. 2015, pp. 1–17, doi: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- [114] S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, and F. Asdrubali, (2016), "Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 988–1011, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.045.
-

-
- [115] R. Baetens *et al.*, (2010), "Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond," *Energy Build*, vol. 42, no. 2, pp. 147–172, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.005.
- [116] E. Stach *et al.*, (2021), "Autonomous experimentation systems for materials development: A community perspective," *Matter*, vol. 4, no. 9, pp. 2702–2726, doi: 10.1016/j.matt.2021.06.036.
- [117] "(Aislamiento térmico) (2016), Determination of Thermal Conductivity of Closed-Cell Insulation Materials That Depend on Temperature and Density."
- [118] AENOR, *UNE-EN 12664 Materiales de construcción (2001)*, "Determinación de la resistencia térmica por medio de métodos de medidor de flujo de calor y placa cliente protegida- productos de resistencia térmica media.
- [119] A. E. de N. y AENOR, Certificación., *UNE-EN 12667 Materiales de construcción (2001)*, "Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor, 2002nd ed. Madrid, España.
- [120] C. Daza Mafioli, E. E. Coral Escobar, and J. Plaza Castillo, (2019), "Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario," *Ing Cienc*, vol. 15, no. 30, pp. 101–116, doi: 10.17230/ingciencia.15.30.5.
- [121] S. Cubos, (2021), "Confort y ambiente," <https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-y-ambiente>
- [122] J. Miura, M. Demura, K. Nishi, and S. Oishi, (2019), (2019), "Thermal comfort measurement using thermal-depth images for robotic monitoring," *Pattern Recognit Lett*, no. xxxx, pp. 1–6, doi: 10.1016/j.patrec.2019.02.014.
- [123] U. Lindberg, P. Fahlén, M. Axell, and N. Fransson, (2017), "Confort thermique dans les supermarchés: diverses méthodes d'enquête et mesures simultanées de l'environnement thermique," *International Journal of Refrigeration*, vol. 82, pp. 426–435, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.06.020.
- [124] S. Cubos, (2021), "Confort térmico y cuerpo humano," <https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano>
- [125] J. Xiong, Z. Lian, X. Zhou, J. You, and Y. Lin, (2015), "Effects of temperature steps on human health and thermal comfort," *Build Environ*, vol. 94, no. P1, pp. 144–154, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.07.032.
- [126] H. Liu *et al.*, (2014), "The response of human thermal perception and skin temperature to step-change transient thermal environments," *Build Environ*, vol. 73, pp. 232–238, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.12.007.
- [127] A. STANDARD 55, (2022), "Thermal environmental conditions for human occupancy." <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>. (accessed Mar. 23).
-

-
- [128] S. Cubos, “Tipo de temperaturas para consignas,” 2021. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/tipo-de-temperatura-para-consignas> (accessed Mar. 23, 2022).
- [129] B. Arballo, E. Kuchen, Y. Alamino, and F. Alción, (2016), “Evaluación de modelos de confort térmico para interiores,” *VIII Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura – CRETA. Desarrollo tecnológico regionalmente sustentable*, no. October, p. 10.
- [130] S. Cubos, (2021), “Modelos estadísticos de confort,”. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/modelos-estadisticos-confort> (accessed Mar. 24, 2022).
- [131] S. Cubos, (2021), “Estandar ASHRAE 55,”. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/estandar-ashrae-55> (accessed Mar. 24, 2022).
- [132] AIE, (2017), “Estadísticas clave de energía en el mundo: Agencia Internacional de Energía.”. <http://www.iea.org/statistics/> (accessed Mar. 15, 2022).
- [133] I. para la diversificación y ahorro de la Energía, (2008), “Procedimientos y aspectos de simulación de instalaciones térmicas en edificios,” Madrid.
- [134] D. Densley Tingley, A. Hathway, and B. Davison, (2015), “An environmental impact comparison of external wall insulation types,” *Build Environ*, vol. 85, pp. 182–189, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.021.
- [135] G. Baldinelli *et al.*, (2019), “Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A Round Robin Test,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 139, no. April 2018, pp. 25–35, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.037.
- [136] B. Abu-Jdayil, A. H. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, and S. Hameedi, (2019), “Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview,” *Constr Build Mater*, vol. 214, pp. 709–735, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102.
- [137] S. P. Patil, V. G. Parale, H. H. Park, and B. Markert, (2021), “Mechanical modeling and simulation of aerogels: A review,” *Ceram Int*, vol. 47, no. 3, pp. 2981–2998, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.09.181.
- [138] C. Li *et al.*, (2021), “A review of silicon-based aerogel thermal insulation materials: Performance optimization through composition and microstructure,” *J Non Cryst Solids*, vol. 553, no. October, p. 120517, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120517.
- [139] L. Huber, S. Zhao, W. J. Malfait, S. Vares, and M. M. Koebel, (2017), “Fast and Minimal-Solvent Production of Superinsulating Silica Aerogel Granulate,” *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 56, no. 17, pp. 4753–4756, doi: 10.1002/anie.201700836.
- [140] Z. Li, S. Zhao, M. M. Koebel, and W. J. Malfait, (2020), “Silica aerogels with tailored chemical functionality,” *Mater Des*, vol. 193, p. 108833, doi: 10.1016/j.matdes.2020.108833.
-

-
- [141] P. G. Pape, (2017), *Adhesion Promoters: Silane Coupling Agents*, Second Edi. Elsevier Inc., doi: 10.1016/B978-0-323-39040-8.00026-2.
- [142] S. Ebnesajjad, (2014), "Surface treatment of materials for adhesive bonding.," *Elsevier*.
- [143] Z. hui Liu, F. Wang, and Z. ping Deng, (2016), "Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel," *Constr Build Mater*, vol. 122, pp. 548–555, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.096.
- [144] S. Khandelwal and K. Y. Rhee, (2021), "Effect of silane modified smectite clay on the hydration, intercalation of PCE superplasticizers, and mechanical strength of cement composites," *Cem Concr Compos*, vol. 123, August 2020, p. 104210, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104210.
- [145] M. Amin, A. M. Zeyad, B. A. Tayeh, and I. Saad Agwa, (2021), "Engineering properties of self-cured normal and high strength concrete produced using polyethylene glycol and porous ceramic waste as coarse aggregate," *Constr Build Mater*, vol. 299, no. March, p. 124243, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124243.
- [146] "Self-curing concrete: (2007), Water retention, hydration and moisture transport," vol. 21, pp. 1282–1287, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.02.007.
- [147] Peter. Bassani, Franco; Liedl, Gerald L; Wyder, (*Aditivos*) (2022), *Encyclopedia of condensed matter physics.pdf*, Elsevier.
- [148] X. Zhao, Q. Dong, J. Yuan, X. Chen, and J. Yang, (2020), "Micro-scale characterization of the heterogeneous properties of in-service cement-treated base material," *Constr Build Mater*, vol. 264, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120696.
- [149] Microtrac MRB, (2021), "Laser Diffraction (LD) for particle characterization down to the nano range," <https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/>.
- [150] V. Corinaldesi, A. Mazzoli, and R. Siddique, (2016), "Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste," *Constr Build Mater*, vol. 123, pp. 281–289, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.011.
- [151] Andrea Deniss Dupré Alvarado, (2019), "Variables que determinan la distribución de tamaño de partículas (PSD), obtenida mediante difracción láser vía húmeda en estándares minerales de filosilicatos y residuos mineros," Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción., Concepción, Chile.
- [152] S. Gul and E. van Oort, (2021), "Automated real-time solids content and salinity analysis of well construction fluids using in-line XRF measurements," *J Nat Gas Sci Eng*, vol. 94, p. 104042, doi: 10.1016/j.jngse.2021.104042.
- [153] G. Świrniak and J. Mroczka, (2022), "Forward and inverse analysis for particle size distribution measurements of disperse samples: A review," *Measurement*, vol. 187, p. 110256, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110256.
-

-
- [154] S. T. Erdoğan, X. Nie, P. E. Stutzman, and E. J. Garboczi, (2010), "Micrometer-scale 3-D shape characterization of eight cements: Particle shape and cement chemistry, and the effect of particle shape on laser diffraction particle size measurement," *Cem Concr Res*, vol. 40, no. 5, pp. 731–739, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.12.006.
- [155] A. Mazzoli and O. Favoni, (2012), "Particle size, size distribution and morphological evaluation of airborne dust particles of diverse woods by Scanning Electron Microscopy and image processing program," *Powder Technol*, vol. 225, pp. 65–71, doi: 10.1016/j.powtec.2012.03.033.
- [156] A. Mazzoli and G. Moriconi, (2014), "Particle size, size distribution and morphological evaluation of glass fiber reinforced plastic (GRP) industrial by-product," *Micron*, vol. 67, pp. 169–178, doi: 10.1016/j.micron.2014.07.007.
- [157] J. Grubbs *et al.*, (2021), "Comparison of laser diffraction and image analysis techniques for particle size-shape characterization in additive manufacturing applications," *Powder Technol*, vol. 391, pp. 20–33, doi: 10.1016/j.powtec.2021.06.003.
- [158] Centro de estudios y experimentación de obras públicas., (2008), "La picnometría de Helio. Fundamentos físicos, normativa, descripción del equipo y procedimiento.," *Ministerio de fomento de medio ambiente y medio rural y marino*.
- [159] H. L. Byers, L. J. McHenry, and T. J. Grundl, (2019), "XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits," *Food Chem X*, vol. 1, no. March 2018, p. 100001, doi: 10.1016/j.fochx.2018.100001.
- [160] J. H. Lovett and H. H. Harris, (2021), "Application of X-ray absorption and X-ray fluorescence techniques to the study of metallodrug action," *Curr Opin Chem Biol*, vol. 61, pp. 135–142, doi: 10.1016/j.cbpa.2020.12.004.
- [161] N. Khajehzadeh, O. Haavisto, and L. Koresaar, (2017), "On-stream mineral identification of tailing slurries of an iron ore concentrator using data fusion of LIBS, reflectance spectroscopy and XRF measurement techniques," *Miner Eng*, vol. 113, no. July, pp. 83–94, doi: 10.1016/j.mineng.2017.08.007.
- [162] Y. Fiamegos, C. Dumitrascu, S. Papoci, and M. B. de la Calle, (2021), "Authentication of PDO paprika powder (Pimentón de la Vera) by multivariate analysis of the elemental fingerprint determined by ED-XRF. A feasibility study," *Food Control*, vol. 120, p. 107496, doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107496.
- [163] Y. Fiamegos *et al.*, (2021), "Are the elemental fingerprints of organic and conventional food different? ED-XRF as screening technique," *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 99, doi: 10.1016/j.jfca.2021.103854.
- [164] L. Perring and A. Tschopp, (2019), "Determination of ash content of milk-based powders by Energy Dispersive X-ray Fluorescence," *Microchemical Journal*, vol. 145, pp. 162–167, doi: 10.1016/j.microc.2018.10.025.
-

-
- [165] A. Ahmad *et al.*, (2021), "Role of XRD for nanomaterial analysis," *Nanomedicine Manufacturing and Applications*, pp. 149–161, doi: 10.1016/B978-0-12-820773-4.00008-1.
- [166] D. Alderton, "X-Ray Diffraction (XRD), (2021)," *Encyclopedia of Geology*, pp. 520–531, doi: 10.1016/b978-0-08-102908-4.00178-8.
- [167] M. Gonon, (2021), "Case studies in the X-ray Diffraction of ceramics," *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, vol. 1, pp. 560–577, doi: 10.1016/B978-0-12-818542-1.00005-9.
- [168] K. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach, (2018), *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. doi: 10.1201/b19074.
- [169] M. MarkDowsett, RitaWiesinger, (2021), "X-Ray Diffraction," *Spectroscopy, Diffraction and tomography in art and heritage science*, pp. 161–207, doi: 10.1016/B978-0-12-818860-6.00011-8.
- [170] M. v Khedkar, S. B. Somvanshi, A. v Humbe, and K. M. Jadhav, (2019), "Surface modified sodium silicate based superhydrophobic silica aerogels prepared via ambient pressure drying process," *J Non Cryst Solids*, vol. 511, no. January, pp. 140–146, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2019.02.004.
- [171] Y. Biskri, D. Achoura, N. Chelghoum, and M. Mouret, (2017), "Mechanical and durability characteristics of High-Performance Concrete containing steel slag and crystalized slag as aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 150, pp. 167–178, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.083.
- [172] "Estudio de la cristalografía y cuantificación por difracción de rayos x en materiales tipo hidrotalcita procedentes de la química del cemento," (2016).
- [173] Universidad de Burgos, (2020), "Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)."
- [174] Laboratorio Nacional de investigaciones en nanociencias y nanotecnología IPICYT, (2022), "Microscopios electrónicos de barrido SEM."
- [175] G. H. Rosas and A. C. INECOL. Instituto de ecología, (2022), "Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster científico y tecnológico Biomimic,".
- [176] S. C. C. Centro de Investigación en materiales avanzados, (2016), "Microscopía Electrónica de Barrido."
- [177] ASTM International, (2011), "Standard Specification for Standard Sand," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.01, no. ASTM C778-06, pp. 1–3, doi: 10.1520/C0778-06.2.
- [178] L. Rodrigues, J. White, M. Gillott, E. Braham, and A. Ishaque, (2018), "Theoretical and experimental thermal performance assessment of an innovative external wall insulation system for social housing retrofit," *Energy Build*, vol. 162, pp. 77–90, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.10.020.
-

-
- [179] C. Buratti, F. Merli, and E. Moretti, (2017), "Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance," *Energy Build*, vol. 152, pp. 472–482, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.071.
- [180] M. Cabinets and M. Rooms, (2007), "ASTM C 1437:2007 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," *American Society for Testing and Materials.*, no. C, pp. 23–24, doi: 10.1520/C1437-07.2.
- [181] ASTM C230, (2010), "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1," *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 4–9, doi: 10.1520/C0230.
- [182] ASTM, (2010), "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1," *Chemical Analysis*, no. C109/C109M – 11b, pp. 1–9, doi: 10.1520/C0109.
- [183] ASTM, (2011), "D 5334-14 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04, no. November, pp. 6–13, doi: 10.1520/D5334-0814.2.
- [184] K. G. Wakili, M. Koebel, T. Glaettli, and M. Hofer, (2015), "Thermal conductivity of gypsum boards beyond dehydration temperature," no. February 2014, pp. 85–94, doi: 10.1002/fam.
- [185] G. Baldinelli *et al.*, (2019), "Thermal conductivity measurement of insulating innovative building materials by hot plate and heat flow meter devices: A Round Robin Test," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 139, no. April 2018, pp. 25–35, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.037.
- [186] C. Mortar *et al.*, (2009), "WSDOT FOP for AASHTO T 231 1," *Annual Book of ASTM Standards*, vol. i, no. January, pp. 1–14, doi: 10.1520/C1565-09.2.
- [187] American Society for Testing and Materials, (2019), "ASTM C31-19_Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field," *ASTM International*, vol. 04, pp. 1–5, doi: 10.1520/C0031.
- [188] Z. hui Liu, F. Wang, and Z. ping Deng, (2016), "Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel," *Constr Build Mater*, vol. 122, pp. 548–555, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.096.
- [189] J. E. Daw, J. L. Rempe, and D. L. Knudson, (2012), "Hot Wire Needle Probe for In-Reactor Thermal Conductivity Measurement," vol. 12, no. 8, pp. 2554–2560.
- [190] C. Alternativo, P. Envolventes, D. E. L. A. Edificación, and A. D. Herrera, (2020), "Facultad de Ingeniería Civil, U,".
- [191] E. Red and C. Bricks, (2014), "Determinación Experimental de la Conductividad Térmica Efectiva en Bloques Extinguidos de Arcilla Roja Experimental Determination of the Effective Thermal Conductivity in the," vol. 5, no. 1, pp. 15–20.
-

-
- [192] J. K. C. A. Durán Herrera, (2015), "Effect of a micro-copolymer addition on the thermal conductivity of fly ash mortars," *Journal of building physics*, doi: doi: 10.1177 / 1744259115611650.
- [193] M. Syarif, V. Sampebulu, M. Wihardi Tjaronge, and Nasruddin, (2018), "Characteristic of compressive and tensile strength using the organic cement compare with Portland cement," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, pp. 2–9, doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00172.
- [194] F. Longo, P. Lassandro, A. Moshiri, T. Phatak, M. A. Aiello, and K. J. Krakowiak, (2020), "Lightweight geopolymer-based mortars for the structural and energy retrofit of buildings," *Energy Build*, vol. 225, p. 110352, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110352.
- [195] X. tong Yu, D. Chen, J. rui Feng, Y. Zhang, and Y. di Liao, (2018), "Behavior of mortar exposed to different exposure conditions of sulfate attack," *Ocean Engineering*, vol. 157, no. January, pp. 1–12, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.017.
- [196] Y. Liu, H. Chen, L. Zhang, and Z. Feng, (2021), "Enhancing building energy efficiency using a random forest model: A hybrid prediction approach," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5003–5012, doi: 10.1016/j.egyr.2021.07.135.
- [197] M. R. S.A. de C.V., (2021), "Vivienda prototipo Santa Barbara,".
- [198] M. Ibrahim, L. Bianco, O. Ibrahim, and E. Wurtz, (2018), "Low-emissivity coating coupled with aerogel-based plaster for walls' internal surface application in buildings: Energy saving potential based on thermal comfort assessment," *Journal of Building Engineering*, vol. 18, no. April, pp. 454–466, doi: 10.1016/j.jobe.2018.04.008.
- [199] W. A. Friess, K. Rakhshan, T. A. Hendawi, and S. Tajerzadeh, (2012), "Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency," *Energy Build*, vol. 44, no. 1, pp. 26–32, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.005.
- [200] J. L. Tze Chen, A. A. Aziz, A. N. Oumer, and M. H. Yusof, (2019), "Energy efficiency analysis in office building through thermal modelling," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 469, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012010.
- [201] H. Huang, W. I. Binti Wan Mohd Nazi, Y. Yu, and Y. Wang, (2020), "Energy performance of a high-rise residential building retrofitted to passive building standard – A case study," *Appl Therm Eng*, vol. 181, no. December 2019, p. 115902, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115902.
- [202] Z. Su, J. Wu, and S. Berti, (2021), "Thermal variables estimation by a metaheuristic-based method: Cases of New Zealand," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5045–5058, doi: 10.1016/j.egyr.2021.08.032.
- [203] F. Ascione, N. Bianco, R. Francesca, D. Masi, and G. Peter, (2013), "Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates," *Energy Build*, vol. 60, pp. 125–138, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.021.
-

-
- [204] F. Winnefeld, L. H. J. Martin, C. J. Müller, and B. Lothenbach, (2017), "Using gypsum to control hydration kinetics of CSA cements," *Constr Build Mater*, vol. 155, pp. 154–163, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.217.
- [205] J. J. Wolf, D. Jansen, F. Goetz-neunhoe, and J. Neubauer, (2020), "Cement and Concrete Research Application of thermodynamic modeling to predict the stable hydrate phase assemblages in ternary CSA-OPC-anhydrite systems and quantitative verification by QXRD," vol. 128, no. October 2019, pp. 1–9, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.105956.
- [206] C. S. Poon, S. C. Kou, L. Lam, and Z. S. Lin, (2021), "Activation of fly ash / cement systems using calcium sulfate anhydrite (CaSO₄)," vol. 31, pp. 2–10.
- [207] S. Ahmad, K. O. Mohaisen, S. K. Adekunle, S. U. Al-dulaijan, and M. Maslehuddin, (2019), "Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures," *Constr Build Mater*, vol. 198, pp. 437–444, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.260.
- [208] A. Hanif, S. Diao, Z. Lu, T. Fan, and Z. Li, (2016), "Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres – Mechanical and thermal insulating properties," *Constr Build Mater*, vol. 116, pp. 422–430, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.134.
- [209] S. Ng, B. Petter, L. Ingunn, C. Sandberg, T. Gao, and Ó. Haralds, (2015), "Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high-performance concrete," *Constr Build Mater*, vol. 77, pp. 307–316, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.064.
- [210] O. Burciaga-Díaz and I. Betancourt-Castillo, (2018), "Characterization of novel blast-furnace slag cement pastes and mortars activated with a reactive mixture of MgO-NaOH," *Cem Concr Res*, vol. 105, no. January, pp. 54–63, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.01.002.
- [211] G. Liu, M. V. A. Florea, and H. J. H. Brouwers, (2019), "Characterization and performance of high-volume recycled waste glass and ground granulated blast furnace slag or fly ash blended mortars," *J Clean Prod*, vol. 235, pp. 461–472, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.334.
- [212] L. Ding, W. Ning, Q. Wang, D. Shi, and L. Luo, (2015), "Preparation and characterization of glass-ceramic foams from blast furnace slag and waste glass," *Mater Lett*, vol. 141, pp. 327–329, doi: 10.1016/j.matlet.2014.11.122.
- [213] A. S. Dhmees, A. M. Rashad, A. A. Eliwa, and M. F. Zawrah, (2019), "Preparation and characterization of nano SiO₂@CeO₂ extracted from blast furnace slag and uranium extraction waste for wastewater treatment," *Ceram Int*, vol. 45, no. 6, pp. 7309–7317, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.01.014.
- [214] L. García Quiñonez, (2016), "Sinterización de magnesia con diferentes concentraciones de óxidos de Nanopartículas mediante láser pulsado.," Universidad Autónoma de Nuevo León.
-

-
- [215] S. He *et al.*, (2018), "Effect of heat treatment on hydrophobic silica aerogel," *J Hazard Mater*, doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.087.
- [216] N. Prieto-taboada, A. Larrañaga, O. Gómez-laserna, and I. Martínez-arkarazo, (2015), "The relevance of the combination of XRD and Raman spectroscopy for the characterization of the CaSO₄ - H₂O system compounds," *Microchemical Journal*, vol. 122, pp. 102–109, doi: 10.1016/j.microc.2015.04.010.
- [217] J. Hot, M. Cyr, E. Augeard, and M. Eekhout, (2015), "An investigation of CaSi silica fume characteristics and its possible utilization in cement-based and alkali-activated materials," *Constr Build Mater*, vol. 101, pp. 456–465, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.051.
- [218] A. Soares, M. de Fátima, I. Flores-colen, L. M. Ilharco, and J. de Brito, (2018), "EN 998-1 performance requirements for thermal aerogel-based renders," vol. 179, pp. 453–460, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.197.
- [219] "NMX-C-404-ONNCCE-2012.pdf - PDFCOFFEE.COM.pdf."
- [220] ASTM C90, (2016), "Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units," *American Society for Testing Material*, vol. 04, no. C, pp. 1–4, doi: 10.1520/C0090-16A.2.
- [221] American Society for testing and materials international, (2017), "Standard specification for nonloadbearing concrete masonry units.," *C129-17*, vol. 04.05.
- [222] UNE 41166-1:2000, (2000), "Concrete units. Definitions, classification and general characteristics."
- [223] ONNCCE, (2013), "Industria de la construcción-mampostería-bloques, tabiques ladrillos y tabicones para uso no estructural-especificaciones y métodos de ensayo.," *NMX-C-441-ONNCCE-2013*.
- [224] Calixto-Aguirre; Verónica Ivette; Huelsz-Lesbros., (2018), "Consumo de energía en edificios en México," *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/4779/477957975006/477957975006.pdf>
- [225] I. energy Agency, (2015), "Building energy performance metrics," 2015, [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/fca4cdfc-ce94-4644-a6a6-5c9f00f7529c/BuildingEnergyPerformanceMetrics.pdf>
- [226] D. Butler, (2008), "Architects of a low-energy future," *Nature Publishing group*, vol. 452, [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/452520a.pdf>
-

APÉNDICES

APENDICE A

GLOSARIO

Analitos.

Es un término químico que se utiliza en el análisis químico, con este nombre se hace referencia a una sustancia, elemento, ion o compuesto determinado, que tiene una gran importancia ya que es la parte que deseamos analizar, por lo tanto, se puede conocer, cuantificar, determinar su cantidad o concentración en la muestra.

Ángulo de contacto.

Es el ángulo que forma la superficie de un líquido al entrar en contacto con un sólido; el valor del ángulo depende principalmente de la relación que existe entre las fuerzas adhesivas entre el líquido y el sólido, además de fuerzas cohesivas; cuando las superficies tienen una fuerza adhesiva grande, el ángulo de humectancia es menor de 90 grados.

Antropogénico.

Es un concepto que hace referencia a los efectos, fenómenos, procesos, que son obtenidos por la influencia de las actividades humanas, es todo aquello que procede del ser humano y que tiene efectos en la naturaleza, por ejemplo: la industria y la contaminación ambiental.

Compatibilización.

Deriva de la palabra compatibilizar, que es un proceso químico que busca la estabilidad de una sustancia cuando se mezcla con otra sustancia, o bien unificando a los materiales que integran a un compuesto provocando reacciones para que su unión sea de mayor eficacia.

Diagrama de psicometría

Es la medición y la representación gráfica del contenido de humedad y temperatura del aire; psicometría es la ciencia que involucra propiedades termodinámicas del aire húmedo y el efecto de la humedad atmosférica en el confort humano.

Energía superficial.

Es la energía necesaria para romper los enlaces intermoleculares dando lugar a una superficie, en la física de los sólidos las superficies deben ser menores energéticamente a los de la masa. La energía superficial de un material debe ser, por lo tanto, la mitad de su energía de cohesión. Es el grado de atracción o repulsión que la superficie de un material ejerce sobre otro.

Fluoróforos.

Es la característica de ciertas sustancias o compuestos químicos que tienen propiedades de reemitir luz, fotones de longitud de onda mayor por medio de la excitación por luz que tiene una longitud de onda inferior.

Fonones.

Es una cuasipartícula portadora de calor y sonido que por medio de movimientos vibratorios transmite el calor a la estructura del esqueleto de un material sólido.

Fotoionización.

Ionización producida por la radiación electromagnética de la región ultravioleta, es un proceso mediante el cual el impacto de un fotón sobre un átomo, ión o molécula, provoca el desprendimiento de un electrón.

Funcionalizado.

Es un proceso químico que inserta grupos funcionales que pueden facilitar la incorporación de otras moléculas que se usan para muchas aplicaciones, sobre todo en la superficie de los materiales provocando enlaces químicos.

Hidrolización.

Es un proceso químico donde se provoca una reacción entre una molécula de agua y otra macromolécula para romper uno o más enlaces químicos y sus átomos, con el fin de subdividir, descomponer moléculas mediante la acción del agua.

Huella de Carbono.

Representa el volumen total de gases de efecto invernadero (GEI) que producen las actividades económicas y cotidianas del ser humano; es el indicador ambiental que mide las emisiones directas como indirectas de compuestos como el metano, el óxido de nitrógeno, los hidrofluorocarburos, los perfluorocarburos, el hexafluoruro de azufre y, sobre todo del más abundante y que más contribuye al calentamiento global el dióxido de carbono (CO₂).

Material homogéneo.

Compuesto que contiene la misma uniformidad en su composición y las mismas propiedades en cualquier parte del material o sistema.

Mesoporoso.

Son los materiales que contienen poros con diámetros de 2 a 50 nm.

Mortero.

Es un producto que se compone de cemento y arena por lo que cuenta con firmeza para ser utilizado en la colocación de elementos de mampostería o bien para recubrir los muros.

Nano- materiales.

Son todos los materiales con dimensiones de nana escala, inferiores a 100 nanómetros en al menos una dimensión de sus características.

Net-Zero.

Es disminuir o recortar las emisiones de gases de efecto invernadero con el objetivo de dejarlas lo más cerca posible a emisiones nulas; es una forma de evaluar que las actividades o medidas llevadas a cabo, consigan no tener un impacto en el clima.

Opacificación.

Es realizar un proceso mediante el cual un cuerpo pierde su transparencia y se vuelve opaco.

Percolación.

Es el flujo o paso lento de algún material fluido a través de los poros o intersticios de una capa permeable, pudiendo o no llegar a los poros de los materiales porosos.

Precursores.

Son sustancias indispensables o necesarias para llegar a producir otras sustancias mediante los compuestos químicos que constituyen una primera etapa en un proceso químico.

Puzolana.

Son materiales que presentan endurecimiento debido a la reacción química al mezclarse con el hidróxido de cal y agua; son materiales aglomerantes que al reaccionar forman compuestos hidráulicos similares a los que se forman durante la hidratación del cemento.

Sacaroidea.

Es referente a la textura de rocas que tiene un contenido de poros intercristalinos compuesta fundamentalmente por cristales de tamaños relativamente equidimensionales y de estructura morfológica semejante al azúcar.

Sintetización.

Es el proceso por el cual se obtienen compuestos químicos a partir de compuestos, materiales simples o precursores químicos.

Surfactantes.

Es un agente activo de la superficie de las sustancias, que tiene cierta acción sobre la tensión superficial llamada también energía libre; se les conoce como tensoactivos porque modifican la actividad superficial o interfacial reduciendo la tensión entre ellas.

Superficie específica.

Es una medida que se aplica a los sólidos con granos o partículas, en donde se mide la superficie por unidad de masa y se determina la superficie disponible de los poros y los pliegues de dichas superficies.

ANEXO I.

Fichas técnicas de materiales.

a) Ficha técnica Sulfato de calcio hemi-hidratado.



Yeso MAXIMO

Descripción del producto

El Yeso Construcción MAXIMO® es un sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), producido a partir de yeso mineral.

Aplicaciones del producto

El Yeso Construcción MAXIMO® es un producto diseñado para usarse en la construcción como recubrimiento o revestimiento de superficies, este tipo de yeso posee altas propiedades de dureza y resistencia.

El Yeso Construcción MAXIMO® por su versatilidad puede considerarse como la forma tradicional del acabado final de los interiores, comúnmente utilizados en la construcción. Al agregarle agua al yeso el fraguado se efectúa gradualmente, permitiendo al aplicador un período largo de plasticidad, sin perder la adherencia sobre la superficie a cubrir.

El Yeso Construcción MAXIMO® permite un acabado liso y de excelente apariencia. Es recomendado para el recubrimiento de cielos, cubrir grietas, rellenar huecos, así como para corregir ondulaciones o defectos y en la fabricación de arcos, molduras y plafones.

Es un material que ofrece alta seguridad al usarse, ya que por sus características no es combustible, ni tóxico.

Especificaciones técnicas

Fraguado	de 45 a 60 minutos
Densidad Aparente	854,61 kg/m ³
Conductividad Térmica	0,1695 W/m·k a espesor de 1 in
Permeabilidad de vapor de agua	0,495 ng/Pa·s·m
Absorción de humedad	0,054% peso / 0,046% volumen
Absorción de agua	48,62% peso
Rendimiento	5 - 7 m ² /bulto a un espesor de 3 mm

La relación yeso agua señalada en los datos técnicos, es la utilizada en los métodos estándar de análisis de Yesera Monterrey®, apegándose a las normas A.S.T.M.



Requisitos de almacenamiento

Cuando se almacena en ambiente seco, este producto tendrá una vida media de uso de un mes a partir de la fecha de la fabricación.

La humedad puede provocar la formación de grumos o cambios en las propiedades físicas, tales como, reducción en la resistencia del yeso o la modificación del tiempo de fraguado.

Para conservar la calidad del producto durante su empleo, los sacos abiertos o parcialmente usados deberán ser cerrados cuidadosamente. Cada saco lleva impreso un código de fabricación con el objeto de facilitar el control y rotación del inventario, de tal manera que el material más viejo sea utilizado primero.

Presentación

El Yeso Construcción MAXIMO® de Yesera Monterrey® está disponible en una presentación; sacos de papel de 40 kilos.

Recomendaciones de uso

1.- Medición: En una batea limpia, libre de residuos de yeso fraguado, agregue agua limpia de acuerdo a la especificación. Vaciar uniformemente y espolvorear en la batea la cantidad de yeso requerida de acuerdo con la cantidad de agua agregada. Nota: El uso de agua en exceso alarga el tiempo de fraguado, da un acabado blando. La falta de agua reduce el tiempo de fraguado y un acabado áspero.

2.- Mezclado: Después de agregar Yeso Construcción MAXIMO® al agua, espere sin batir hasta que el polvo esté totalmente humectado.

3.- Limpieza: Antes de aplicar el yeso verifique que la superficie que se va a cubrir esté libre de impurezas, aceites, grasas, sales solubles, salitres y trasminación de agua del exterior.

Nota: En lozas, debe de estar preferentemente bien impermeabilizado antes de aplicar el yeso.

4.- Material: Utilice una regla o espátula para plomear y planear el acabado, estas deben estar completamente limpias y libres de yeso fraguado.

Seguridad e higiene

En caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua corriente, limpia y jabón por 15 min. Si tiene contacto prolongado con la piel, lavar con agua a corriente y jabón por 15 min. El producto no es tóxico, pero en caso de ingestión puede causar malestares en garganta, enjuague con abundante agua y tirela y consulte a su médico. En caso de inhalación, retirar a la persona a un lugar ventilado y fresco, administrar oxígeno si respira con dificultad y consulte a su médico.

Descargo de responsabilidad

Dado que no controlamos las condiciones de transporte, almacenaje y/o métodos de uso de nuestro producto en sus instalaciones, no asumimos responsabilidad alguna por lesión a personas, pérdida o daño a bienes, debido al uso incorrecto del producto y expresamente nos deslindamos de toda responsabilidad por el uso del material. Toda la información ha sido suministrada de buena fe, pero puede estar sujeta a modificaciones.



**yesera
monterrey®**

Para obtener información adicional relacionada con los productos de la marca, o asesoría técnica acerca de cualquier aspecto relacionado con los productos de Yesera Comercial, S. A., por favor solicítela en:

Oficinas Generales:
Oficinas, Serafín Peña 938 sur.
C. P.64000, Monterrey, N. L. Méx.

Lugar de fabricación:
Planta San Luis Potosí:
Av. Comisión Federal de Electricidad 775
esq. Eje 136, zona ind. San Luis Potosí, SLP. C.P. 78421
Tel: +52 (444) 824 0748
Tel: +52 (444) 824 2432
Fax: (444) 824 0749

b) Ficha técnica Aerogel A3100



AEROGEL

ENOVA[®] IC3100 AEROGEL

Product highlights

ENOVA IC3100 aerogel is a thermally insulative coatings additive. With a thermal conductivity that is half the conductivity of still air, and a particle size that can deliver a smooth, even coat, ENOVA IC3100 aerogel is suitable for use in a variety of thin film insulative coating applications, and can enable coatings that provide functional advantages including:

- ♦ Ultra-low thermal conductivity
- ♦ Extreme resistance to shear
- ♦ Safe touch performance for personnel protection
- ♦ Complete hydrophobicity
- ♦ Smooth and even finish



PRODUCT FEATURES	
PROPERTY	DATA
Particle size range	2-40 μm
Pore diameter	$\sim 20 \text{ nm}$
Surface area	600-800 m^2/g
Particle density	$\sim 20 \text{ nm}$
	120-150 kg/m^3
	7.5-9.4 lb/ft^3
	1-1.25 lb/gal (US)
Surface chemistry	Hydrophobic
Thermal conductivity	0.012W/m.K at 25°C
CAS RN	102262-30-6

The data in the table above are typical test values intended as guidance only; they are not product specifications. Product specifications are available upon request from your Cabot representative.

For information on product-specific storage conditions, please refer to the applicable Safety Data Sheet (SDS) available from your Cabot representative or at cabotcorp.com.

Enova is a registered trademark of Cabot Corporation.

AMERICA
Business & Technology Center
157 Concord Road
Billerica, MA 01823-7001
United States
T +1 800 462 2313
NA_Aerogel_Sales@cabotcorp.com

EUROPE
Cabot Aerogel GmbH
Industriepark Höchst, Bldg. D-660
Frankfurt am Main 65926
GERMANY
T +49 69 305 6087
aerogel@cabotcorp.com

The data and conclusions contained herein are based on work believed to be reliable, however, Cabot cannot and does not guarantee that similar results and/or conclusions will be obtained by others. This information is provided as a convenience and for informational purposes only. No guarantee or warranty as to this information, or any product to which it relates, is given or implied. This information may contain inaccuracies, errors or omissions and CABOT DISCLAIMS ALL WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AS TO (I) SUCH INFORMATION, (II) ANY PRODUCT OR (III) INTELLECTUAL PROPERTY INFRINGEMENT. In no event is Cabot responsible for, and Cabot does not accept and hereby disclaims liability for, any damages whatsoever in connection with the use of or reliance on this information or any product to which it relates.



© 2022 Cabot Corporation
12/2022

c) Ficha técnica Aerogel A3110



AEROGEL

ENOVA[®] IC3110 AEROGEL

Product highlights

ENOVA IC3110 aerogel is an insulative coatings additive. With a thermal conductivity that is half the conductivity of still air, and a particle size that can deliver extremely high film build, ENOVA IC3110 aerogel can enable coatings that rival the performance of traditional insulation forms.

Benefits in end-use applications include:

- ◆ Ultra-low thermal conductivity
- ◆ Insulation performance unaffected by shear
- ◆ Broad particle size distribution for high packing factor
- ◆ Complete hydrophobicity
- ◆ High single pass DFT
- ◆ Safe touch performance for personnel protection



PRODUCT FEATURES	
PROPERTY	DATA
Particle size range	0.1 - 0.7mm
Pore diameter	~20nm
Particle density	120 - 150kg/m ³
	7.5 - 9.4lb/ft ³
Surface chemistry	Hydrophobic
	0.012W/m.K at 25°C
Thermal conductivity	0.083Btu.in/hr.ft ² .°F at 77°F
CAS RN	102262-30-6

The data in the table above are typical test values intended as guidance only; they are not product specifications. Product specifications are available upon request from your Cabot representative.

For information on product-specific storage conditions, please refer to the applicable Safety Data Sheet (SDS) available from your Cabot representative or at cabotcorp.com.

Enova is a trademark of Cabot Corporation.

AMERICA
Business & Technology Center
357 Concord Road
Bellevue, MA 01823-7001
United States
T +1 800 462 2333
NA.Aerogel.Sales@cabotcorp.com

EUROPE
Cabot Aerogel GmbH
Industriepark Höchst, Bldg. D 640
Frankfurt am Main 65926
GERMANY
T +49 69 305 8067
enova@cabotcorp.com

The data and conclusions contained herein are based on work believed to be reliable, however, Cabot cannot and does not guarantee that similar results and/or conclusions will be obtained by others. This information is provided as a convenience and for informational purposes only. No guarantee or warranty as to this information, or any product to which it relates, is given or implied. This information may contain inaccuracies, errors or omissions and CABOT DISCLAIMS ALL WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AS TO (I) SUCH INFORMATION, (II) ANY PRODUCT OR (III) INTELLECTUAL PROPERTY INFRINGEMENT. In no event is Cabot responsible for, and Cabot does not accept and hereby disclaims liability for, any damages whatsoever in connection with the use of or reliance on this information or any product to which it relates.



©2021 Cabot Corporation
03/2021

d) Ficha técnica Aerogel A3120.



AEROGEL

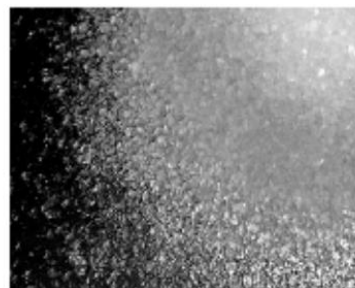
ENOVA[®] IC3120 AEROGEL

Product highlights

ENOVA IC3120 aerogel is an insulative coatings additive. With a thermal conductivity that is half the conductivity of still air, and a particle size that can deliver extremely high film build, ENOVA IC3120 aerogel can enable coatings that rival the performance of traditional insulation forms.

Benefits in end-use applications include:

- ◆ Ultra-low thermal conductivity
- ◆ Insulation performance unaffected by shear
- ◆ Broad particle size distribution for high packing factor
- ◆ Complete hydrophobicity
- ◆ High single pass DFT
- ◆ Safe touch performance for personnel protection



PRODUCT FEATURES	
PROPERTY	DATA
Particle size range	0.1 - 1.2mm
Pore diameter	~20nm
Particle density	120 - 150kg/m ³
	7.5 - 9.4lb/ft ³
Surface chemistry	1 - 1.25lb/gal (US)
	Hydrophobic
Thermal conductivity	0.012W/m.K at 25°C
	0.083Btu.in/hr.ft ² .°F at 77°F
CAS RN	102262-30-6

The data in the table above are typical test values intended as guidance only; they are not product specifications. Product specifications are available upon request from your Cabot representative.

For information on product-specific storage conditions, please refer to the applicable Safety Data Sheet (SDS) available from your Cabot representative or at cabotcorp.com.

Enova is a trademark of Cabot Corporation.

AMERICA
Business & Technology Center
157 Concord Road
Billerica, MA 01823-7001
United States
T +1 800 462 2313
NA.Aerogel.Sales@cabotcorp.com

EUROPE
Cabot Aerogel GmbH
Industriepark Höchst, Bldg. D 660
Frankfurt am Main 65926
GERMANY
T +49 69 305 8007
aerogel@cabotcorp.com

The data and conclusions contained herein are based on work believed to be reliable, however, Cabot cannot and does not guarantee that similar results and/or conclusions will be obtained by others. This information is provided as a convenience and for informational purposes only. No guarantee or warranty as to this information, or any product to which it relates, is given or implied. This information may contain inaccuracies, errors or omissions and CABOT DISCLAIMS ALL WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AS TO (I) SUCH INFORMATION, (II) ANY PRODUCT OR (III) INTELLECTUAL PROPERTY INFRINGEMENT. In no event is Cabot responsible for, and Cabot does not accept and hereby disclaims liability for, any damages whatsoever in connection with the use of or reliance on this information or any product to which it relates.



©2021 Cabot Corporation
03/2021

e) Ficha técnica Aerogel A1000.



AEROGEL

LUMIRA® TRANSLUCENT AEROGEL LA1000; LA2000

Product highlights

The superior properties of translucent Lumira aerogel, make it the obvious choice for insulating a wide variety of daylighting systems from glass to polycarbonate. Its light transmitting nature and superior thermal performance result in enhanced energy efficiency while enabling a wide range of commercial and residential building design choices.



Performance benefits:

- ◆ Hydrophobic/water repellent
- ◆ UV stability
- ◆ Sound absorption
- ◆ Thermal insulation
- ◆ High light transmission
- ◆ Lightweight
- ◆ Non-combustible
- ◆ Inert

For information on product-specific storage conditions, please refer to the applicable Safety Data Sheet (SDS) available from your Cabot representative or at cabotcorp.com.

Enova is a trademark of Cabot Corporation.

AMERICA
Business & Technology Center
157 Concord Road
Milwata, MA 01823-7001
United States
T +1 800 462 2313
NA_Aerogel_Sales@cabotcorp.com

EUROPE
Cabot Aerogel GmbH
Industriepark Höchst, Bldg. D 660
Frankfurt am Main 65926
GERMANY
T +49 69 305 8087
europa@cabotcorp.com

The data and conclusions contained herein are based on work believed to be reliable, however, Cabot cannot and does not guarantee that similar results and/or conclusions will be obtained by others. This information is provided as a convenience and for informational purposes only. No guarantee or warranty as to this information, or any product to which it relates, is given or implied. This information may contain inaccuracies, errors or omissions and CABOT DISCLAIMS ALL WARRANTIES EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AS TO (I) SUCH INFORMATION, (II) ANY PRODUCT OR (III) INTELLECTUAL PROPERTY INFRINGEMENT. In no event is Cabot responsible for, and Cabot does not accept and hereby disclaims liability for, any damages whatsoever in connection with the use of or reliance on this information or any product to which it relates.



©2021 Cabot Corporation
08/2021

f) Ficha técnica Aditivo PEG-PPG-PEG (COP).

SIGMA-ALDRICH[®]

sigma-aldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

Email USA: techserv@sial.com

Outside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:

Poly(ethylene glycol)-block-poly(propylene glycol)-block-poly(ethylene glycol) - average M_n ~5,800

Product Number:

435465

CAS Number:

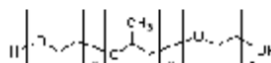
9003-11-6

MDL:

MFCD00082049

Formula:

(C₃H₆O.C₂H₄O)_x



TEST	Specification
Appearance (Color) May be Hazy	Colorless or White
Appearance (Form)	Semi-solid
Infrared spectrum	Conforms to Structure
Proton NMR	
% Ethylene Glycol	
Approximately 30 wt%	
Recommended Retest Period	-----
2 Years	
Specification: PRD.0.ZQ5.10000022061	

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

1 of 1

g) Ficha técnica Aditivo Triethoxysilane (S).

SIGMA-ALDRICH[®]

sigmaaldrich.com

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: www.sigmaaldrich.com

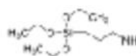
Email USA: techserv@sial.com

Outside USA: eurtechserv@sial.com

Product Specification

Product Name:
(3-Aminopropyl)triethoxysilane – 99%

Product Number: 440140
CAS Number: 919-30-2
MDL: MFCD00008207
Formula: C₉H₂₃NO₃Si
Formula Weight: 221.37 g/mol



TEST	Specification
Appearance (Color)	Colorless
Appearance (Form)	Liquid
Infrared Spectrum	Conforms to Structure
Color Test	≤ 25 APHA
Purity (GC)	≥ 98.5 %
Expiration Date Period	-----
2 Years	

Specification: PRD.1.ZQ5.10000027944

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at Sigma-Aldrich.com. For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.

1 of 1

h) Ficha técnica Hidróxido de Calcio (Ca(OH)₂).

CTR SCIENTIFIC
FICHA TÉCNICA

 **CTR**
SCIENTIFIC

HIDROXIDO DE CALCIO RA
Calcium Hydroxide

DESCRIPCIÓN GENERAL


FORMULA: Ca (OH)₂
PESO MOLECULAR: 74.09 g/mol
N° CAS: 1305-62-0
SINÓNIMOS: No aplica
APARIENCIA TÍPICA: Solido blanco
USOS: Reactivo de análisis y diversos usos industriales

DETERMINACIONES	ESPECIFICACIÓN
Ensayo	≥ 95.0 %
Cloruros	≤ 0.03 %
Insolubles en ácido clorhídrico	≤ 0.03 %
Compuestos de sulfuro	≤ 0.1 %
Estroncio	≤ 0.05 %
Fierro	≤ 0.05 %
Magnesio	≤ 0.5 %
Metales pesados	≤ 0.003 %
Potasio	≤ 0.05 %
Sodio	≤ 0.05 %

PELIGROSIDAD: Este producto es inflamable, corrosivo y provoca irritación cutánea, lesiones oculares graves e irritación de las vías respiratorias



ALMACENAJE: Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Almacenar a temperatura ambiente 15-30°C.


QBP J. Elizabeth Martínez Hdz
Químico Responsable

CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES S.A. DE C.V.
AV. LINCOLN NO. 3410 PTE. MITRAS NORTE. C.P. 64320.
MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO.
Tel. (81) 8158 0600
ctrscientific@ctr.com.mx
www.ctr.com.mx

i) Ficha técnica Sulfato de Potasio (K_2SO_4).

CTR SCIENTIFIC
FICHA TÉCNICA



SULFATO DE POTASIO RA

Potassium sulfate

DESCRIPCIÓN GENERAL

FORMULA:	K_2SO_4 .	USOS:	Reactivo de análisis y diversos usos industriales.
PESO MOLECULAR:	174.26 g/mol	SOLUBILIDAD ACUOSA:	11 g/100 ml a 20°C
N° CAS:	7778-80-5		
SINÓNIMOS:	Sal de dipotasio.		

DETERMINACIONES	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN
Ensayo	Volumétrico	≥98.0%
Apariencia	Potenciométrico	Sólido, polvo cristalino blanco
pH solución al 5%	Gravimétrico	5.5-8.5
Materia insoluble	Colorimétrico	≤0.01%
Cloruros	Colorimétrico	≤0.001%

PELIGROSIDAD:

Esta sustancia no es considerada peligrosa de acuerdo al sistema globalmente armonizado.

ALMACENAMIENTO:

Mantener en contenedores bien cerrados y en un lugar fresco, seco y bien ventilado. Almacenar a la misma temperatura que el contenedor original. Almacenar lejos de materiales incompatibles y el calor.

Materiales incompatibles: Ácidos y agentes oxidantes.

I.Q. Alan E. Colorado
Químico Responsable

ANEXO II.

Tarjetas DRX de materiales.

Anhidrita

Date: 9/8/2021 Time: 10:46:42 AM

File: HighScore Plus - Anhidrita

User: User

Name and formula

Reference code: 01-080-6363
Mineral name: Anhydrite
Compound name: Calcium Sulfate
PDF index name: Calcium Sulfate
Empirical formula: CaO_4S
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{SO}_4)$

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
Space group: *Amma*
Space group number: 63
a (Å): 7.0014
b (Å): 6.9934
c (Å): 6.2417
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000
Volume of cell (10^6 pm^3): 305.61
Z: 4.00
RIR: 1.76

Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern
Subfiles: Cement and Hydration Product, Ceramic, Ceramic - Bioceramic, Common Phase, Excipient, Forensic, Inorganic, Mineral, Mineral - Mineral, Mineral - Natural, Pharmaceutical
Quality: Star (S)

Comments

ANX: ABX4
ICSD collection code: 183919
Creation Date: 9/1/2013
Cross-References: ICSD:183919
ANX: ABX4
Analysis: Ca1 O4 S1
Formula from original source: Ca (S O4)
ICSD Collection Code: 183919
Calculated Pattern Original Remarks: For description of atomic environment (AE) see isotypic compound in CCode 40043
Sample Source or Locality: Baldonnell sedimentary formation, west-central Alberta, Canada
Wyckoff Sequence: g f c2 (AMMA)
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++
Structure: Antao, S.M., Powder Diffr., 26, 326, (2011)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [°]	I [%]
1	0	1	1	4.65672	19.043	0.1
2	1	1	1	3.87740	22.918	4.7
3	0	2	0	3.50068	25.423	100.0
4	2	0	0	3.50068	25.423	100.0
5	0	0	2	3.12086	28.579	2.4
6	1	0	2	2.85049	31.356	34.5
7	2	1	1	2.79819	31.958	3.6
8	2	2	0	2.47394	36.283	7.6

1 Of 4

Date: 9/8/2021 Time: 10:46:42 AM

File: HighScore Plus - Anhidrita

User: User

9	0	2	2	2.32836	38.639	20.7
10	2	0	2	2.32836	38.639	20.7
11	1	2	2	2.20939	40.809	22.0
12	0	3	1	2.18380	41.309	6.7
13	1	3	1	2.08643	43.332	6.9
14	3	1	1	2.08643	43.332	6.9
15	0	1	3	1.99419	45.445	4.9
16	2	2	2	1.93870	46.822	3.7
17	1	1	3	1.91791	47.361	0.3
18	3	0	2	1.86900	48.679	15.1
19	2	3	1	1.85284	49.132	3.3
20	4	0	0	1.75034	52.219	7.5
21	0	4	0	1.74835	52.283	7.5
22	2	1	3	1.73276	52.789	0.3
23	3	2	2	1.64831	55.722	14.6
24	4	1	1	1.63842	56.088	0.4
25	3	3	1	1.59457	57.773	2.6
26	2	4	0	1.56413	59.007	3.3
27	4	2	0	1.56413	59.007	3.3
28	0	3	3	1.55224	59.504	0.1
29	0	4	2	1.52530	60.665	2.9
30	4	0	2	1.52530	60.665	2.9
31	1	3	3	1.51544	61.101	1.0
32	3	1	3	1.51544	61.101	1.0
33	1	4	2	1.49035	62.243	5.1
34	0	2	4	1.42498	65.445	2.8
35	2	0	4	1.42498	65.445	2.8
36	2	3	3	1.41900	65.755	1.0
37	2	4	2	1.39910	66.812	1.7
38	4	2	2	1.39910	66.812	1.7
39	1	2	4	1.39635	66.961	2.2
40	0	5	1	1.36578	68.666	0.7
41	4	3	1	1.36578	68.666	0.7
42	1	5	1	1.34096	70.121	0.1
43	5	1	1	1.34096	70.121	0.1
44	2	2	4	1.31982	71.414	4.5
45	4	1	3	1.31549	71.685	0.2
46	3	0	4	1.29718	72.858	1.6
47	3	3	3	1.29247	73.166	0.1
48	3	4	2	1.27679	74.215	5.6
49	5	0	2	1.27679	74.215	5.6
50	2	5	1	1.27160	74.569	0.2
51	4	4	0	1.23697	77.032	1.0
52	0	1	5	1.22892	77.630	0.1
53	3	2	4	1.21619	78.598	3.7
54	1	1	5	1.21041	79.047	0.1
55	5	2	2	1.19998	79.871	2.0
56	3	5	1	1.17815	81.661	0.4
57	5	3	1	1.17815	81.661	0.4
58	6	0	0	1.16689	82.620	2.2
59	4	0	4	1.16557	82.734	2.3
60	0	6	0	1.16557	82.734	2.3
61	0	5	3	1.16077	83.152	0.6
62	4	3	3	1.16077	83.152	0.6
63	2	1	5	1.15954	83.259	0.4
64	4	4	2	1.14994	84.113	0.4
65	1	4	4	1.14841	84.250	0.9
66	6	1	1	1.13190	85.771	0.1
67	6	2	0	1.10689	88.200	2.0
68	2	4	4	1.10507	88.383	3.9
69	4	2	4	1.10507	88.383	3.9
70	2	5	3	1.10178	88.716	0.2
71	0	3	5	1.10048	88.849	0.4
72	6	0	2	1.09299	89.621	0.1
73	0	6	2	1.09190	89.735	0.1
74	1	3	5	1.08737	90.211	0.1
75	3	1	5	1.08737	90.211	0.1
76	1	6	2	1.07886	91.122	1.8
77	4	5	1	1.07630	91.400	0.1
78	2	3	5	1.04983	94.401	0.1
79	6	2	2	1.04321	95.189	1.3
80	3	4	4	1.04176	95.364	2.0
81	5	0	4	1.04176	95.364	2.0

2 Of 4

82	5	3	3	1.04029	95.542	0.9
83	0	0	6	1.04029	95.542	0.9
84	5	4	2	1.03152	96.621	1.2
85	1	0	6	1.02918	96.914	0.5
86	6	3	1	1.02918	96.914	0.5
87	6	1	3	1.00714	99.785	0.3
88	4	1	5	1.00577	99.971	0.1
89	5	2	4	0.99876	100.933	0.6
90	0	2	6	0.99719	101.153	1.6
91	2	0	6	0.99719	101.153	1.6
92	3	6	2	0.98901	102.313	2.2
93	0	7	1	0.98713	102.583	0.8
94	1	2	6	0.98713	102.583	0.8
95	1	7	1	0.97737	104.023	0.1
96	5	5	1	0.97737	104.023	0.1
97	4	6	0	0.97057	105.057	1.7
98	6	4	0	0.97057	105.057	1.7
99	4	4	4	0.96935	105.246	1.4
100	2	2	6	0.95895	106.887	0.8
101	7	0	2	0.95247	107.945	0.6
102	2	7	1	0.94952	108.437	0.1
103	6	0	4	0.93450	111.033	0.1
104	0	6	4	0.93382	111.155	0.1
105	0	5	5	0.93164	111.546	0.1
106	4	3	5	0.93164	111.546	0.1
107	4	6	2	0.92679	112.434	0.7
108	6	4	2	0.92679	112.434	0.7
109	1	6	4	0.92562	112.651	0.3
110	1	5	5	0.92321	113.100	0.1
111	5	1	5	0.92321	113.100	0.1
112	7	2	2	0.91899	113.901	1.0
113	3	2	6	0.91691	114.301	0.1
114	3	7	1	0.90865	115.932	0.1
115	2	6	4	0.90281	117.127	0.9
116	6	2	4	0.90281	117.127	0.9
117	0	7	3	0.90061	117.588	0.1
118	2	5	5	0.90004	117.709	0.2
119	5	4	4	0.89520	118.740	0.5
120	0	4	6	0.89426	118.943	1.2
121	4	0	6	0.89426	118.943	1.2
122	1	4	6	0.88680	120.599	0.5
123	6	5	1	0.88680	120.599	0.5
124	0	1	7	0.88451	121.121	0.1
125	1	1	7	0.87754	122.755	0.1
126	8	0	0	0.87517	123.326	0.4
127	0	8	0	0.87417	123.569	0.4
128	3	6	4	0.86699	125.365	1.0
129	2	4	6	0.86620	125.567	1.5
130	4	2	6	0.86620	125.567	1.5
131	5	6	2	0.86106	126.913	1.0
132	2	1	7	0.85756	127.856	0.1
133	8	2	0	0.84898	130.275	0.3
134	2	8	0	0.84813	130.524	0.3
135	6	1	5	0.84620	131.096	0.1
136	0	8	2	0.84177	132.437	0.4
137	7	0	4	0.84177	132.437	0.4
138	7	3	3	0.84077	132.749	0.1
139	3	7	3	0.84022	132.922	0.1
140	7	4	2	0.83641	134.134	1.0
141	1	8	2	0.83576	134.346	1.0
142	1	3	7	0.82700	137.322	0.1
143	3	1	7	0.82700	137.322	0.1
144	6	6	0	0.82465	138.165	1.6
145	4	6	4	0.82416	138.344	1.1
146	6	4	4	0.82416	138.344	1.1
147	6	5	3	0.82294	138.790	0.3
148	4	5	5	0.82220	139.068	0.1
149	2	8	2	0.81866	140.416	0.7
150	7	2	4	0.81866	140.416	0.7
151	5	2	6	0.81222	143.023	0.6
152	8	3	1	0.81222	143.023	0.6
153	2	3	7	0.81021	143.881	0.2
154	5	7	1	0.80646	145.554	0.1

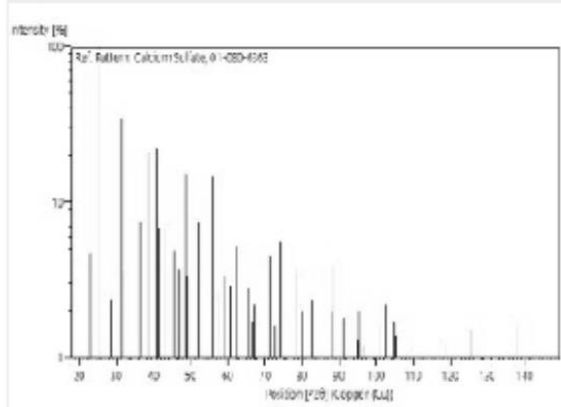
Date: 9/8/2021 Time: 10:46:42 AM

File: HighScore Plus - Anhidrita

User: User

155	7	5	1	0.80646	145,554	0.1
156	4	7	3	0.80061	148,369	0.3
157	6	3	5	0.80061	148,369	0.3

Stick Pattern



Basanita

Date: 9/8/2021 Time: 10:45:57 AM

File: HighScore Plus - Anhidrita

User: User

Name and formula

Reference code: 01-063-0439
Mineral name: Bassanite, syn
Compound name: Calcium Sulfate Hydrate
PDF index name: Calcium Sulfate Hydrate
Empirical formula: $\text{CaHO}_{4.5}\text{S}$
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{0.5}$

Crystallographic parameters

Crystal system: Monodinic
Space group: I2
Space group number: 5
a (Å): 12.0317
b (Å): 6.9269
c (Å): 12.6712
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.2700
Gamma (°): 90.0000
Volume of cell (10^6 pm^3): 1056.04
Z: 12.00
RIR: 1.04

Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern
Subfiles: Cement and Hydration Product, Ceramic, Ceramic - Bioceramic, Common Phase, Inorganic, Mineral, Mineral - Mineral, Mineral - Synthetic
Quality: Star (S)

Comments

ANX: A2B2X9
ICSD collection code: 79529
Creation Date: 9/1/1998
Modification Date: 9/1/2011
Cross-References: ICSD:79529
ANX: A2B2X9
Analysis: H1 Ca1 O4.5 S1
Formula from original source: Ca (S O4) (H2 O)0.5
ICSD Collection Code: 79529
Wyckoff Sequence: c18 b a2(I121)
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++, (2004)
Structure: Bezou, C., Nonat, A., Mutin, J.- C., Christensen, A.N., Lehmann, M.S., J. Solid State Chem., **117**, 165, (1995)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [°]	I [%]
1	1	0	1	8.74552	10.106	0.6
2	-1	0	1	8.74552	10.106	0.6
3	0	0	2	6.33553	13.967	0.6
4	1	1	0	6.00309	14.745	100.0
5	2	0	0	6.00309	14.745	100.0
6	-2	0	2	4.37276	20.292	2.3
7	2	0	2	4.35250	20.388	3.9
8	1	1	2	4.35250	20.388	3.9
9	2	1	1	4.28046	20.735	1.0

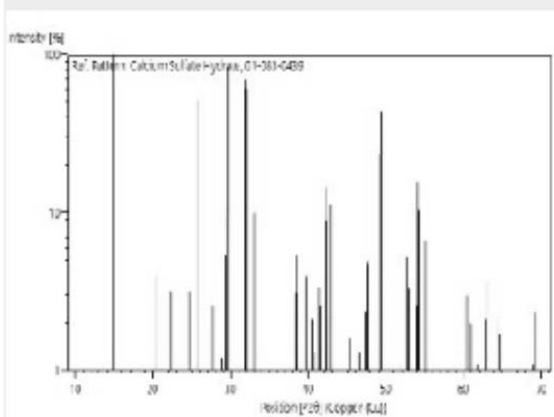
1 Of 4

10	-2	1	1	4.28046	20.735	1.0
11	1	0	3	3.97940	22.323	3.2
12	-1	0	3	3.97940	22.323	3.2
13	3	0	1	3.81840	23.277	0.7
14	-3	0	1	3.81840	23.277	0.7
15	0	1	3	3.60617	24.667	3.2
16	0	2	0	3.47077	25.646	50.5
17	3	1	0	3.47077	25.646	50.5
18	1	2	1	3.22013	27.680	2.6
19	-1	2	1	3.22013	27.680	2.6
20	0	0	4	3.16776	28.147	0.4
21	2	1	3	3.08754	28.894	1.2
22	-3	1	2	3.04917	29.266	5.4
23	3	1	2	3.03899	29.366	10.0
24	0	2	2	3.03899	29.366	10.0
25	2	2	0	3.00154	29.741	84.6
26	4	0	0	3.00154	29.741	84.6
27	-3	0	3	2.91517	30.643	0.4
28	3	0	3	2.90149	30.791	0.4
29	-1	1	4	2.80435	31.886	69.9
30	-2	0	4	2.80435	31.886	69.9
31	2	0	4	2.79748	31.966	60.0
32	1	1	4	2.79748	31.966	60.0
33	4	0	2	2.71500	32.965	10.0
34	-2	2	2	2.71500	32.965	10.0
35	4	1	1	2.69342	33.236	0.9
36	-4	1	1	2.69342	33.236	0.9
37	1	2	3	2.61253	34.297	1.0
38	-1	2	3	2.61253	34.297	1.0
39	3	2	1	2.56850	34.903	0.8
40	-3	2	1	2.56850	34.903	0.8
41	1	0	5	2.48216	36.159	0.1
42	-1	0	5	2.48216	36.159	0.1
43	0	1	5	2.37994	37.769	0.7
44	5	0	1	2.36202	38.067	0.2
45	-5	0	1	2.36202	38.067	0.2
46	-3	1	4	2.34452	38.362	3.1
47	3	1	4	2.33750	38.482	5.4
48	0	2	4	2.33750	38.482	5.4
49	-4	1	3	2.31445	38.880	0.6
50	4	1	3	2.30530	39.041	0.8
51	1	3	0	2.26759	39.717	3.9
52	4	2	0	2.26759	39.717	3.9
53	-3	2	3	2.23030	40.410	0.9
54	3	2	3	2.22415	40.527	2.1
55	-2	1	5	2.21641	40.674	0.9
56	2	1	5	2.20970	40.803	1.3
57	-2	2	4	2.18137	41.357	3.4
58	4	0	4	2.17612	41.462	2.6
59	2	2	4	2.17612	41.462	2.6
60	-4	2	2	2.14023	42.190	9.0
61	-5	1	2	2.14023	42.190	9.0
62	-1	3	2	2.13556	42.287	14.3
63	5	1	2	2.13556	42.287	14.3
64	2	3	1	2.12570	42.492	2.1
65	-2	3	1	2.12570	42.492	2.1
66	0	0	6	2.11184	42.785	11.1
67	-5	0	3	2.09505	43.145	0.3
68	5	0	3	2.08658	43.329	0.3
69	0	3	3	2.02599	44.693	1.0
70	1	2	5	2.01500	44.950	0.4
71	-1	2	5	2.01500	44.950	0.4
72	6	0	0	2.00526	45.181	0.8
73	3	3	0	2.00103	45.281	1.6
74	-1	1	6	1.99363	45.459	0.8
75	-2	0	6	1.99363	45.459	0.8
76	2	0	6	1.99070	45.530	0.7
77	1	1	6	1.99070	45.530	0.7
78	5	2	1	1.95142	46.499	1.3
79	-5	2	1	1.95142	46.499	1.3
80	-2	3	3	1.92135	47.271	0.8
81	2	3	3	1.91872	47.340	0.9
82	-6	0	2	1.91438	47.453	2.4

83	6	0	2	1.90941	47.585	4.9
84	-3	3	2	1.90941	47.585	4.9
85	-6	1	1	1.90683	47.653	4.6
86	3	3	2	1.90683	47.653	4.6
87	4	1	5	1.86237	48.864	0.8
88	-4	2	4	1.85071	49.192	23.5
89	-5	1	4	1.85071	49.192	23.5
90	4	2	4	1.84260	49.423	43.7
91	1	3	4	1.84260	49.423	43.7
92	-3	2	5	1.82477	49.939	0.4
93	4	3	1	1.81198	50.316	0.4
94	-4	3	1	1.81198	50.316	0.4
95	-3	1	6	1.80739	50.453	0.3
96	3	1	6	1.80086	50.648	0.2
97	0	2	6	1.80086	50.648	0.2
98	-1	0	7	1.79260	50.898	0.5
99	-5	2	3	1.79260	50.898	0.5
100	5	2	3	1.78729	51.060	0.8
101	1	0	7	1.78729	51.060	0.8
102	-6	1	3	1.75554	52.052	0.2
103	-5	0	5	1.74955	52.244	0.7
104	6	1	3	1.74955	52.244	0.7
105	6	2	0	1.73538	52.703	5.3
106	0	4	0	1.73172	52.823	3.3
107	-4	0	6	1.73172	52.823	3.3
108	4	0	6	1.72456	53.060	0.6
109	2	2	6	1.72456	53.060	0.6
110	0	3	5	1.70677	53.657	0.5
111	-6	0	4	1.69794	53.958	2.6
112	1	4	1	1.69794	53.958	2.6
113	-3	3	4	1.69357	54.109	15.7
114	3	3	4	1.69073	54.207	10.3
115	6	0	4	1.69073	54.207	10.3
116	-4	3	3	1.68213	54.507	0.7
117	-2	1	7	1.68213	54.507	0.7
118	4	3	3	1.67861	54.631	0.6
119	2	1	7	1.67861	54.631	0.6
120	-6	2	2	1.67547	54.742	0.6
121	7	1	0	1.66821	55.000	5.8
122	2	4	0	1.66604	55.078	6.6
123	5	3	0	1.66604	55.078	6.6
124	3	0	7	1.64697	55.771	0.1
125	-2	3	5	1.64334	55.905	0.2
126	2	3	5	1.64060	56.007	0.4
127	-7	1	2	1.61504	56.973	0.4
128	2	4	2	1.60903	57.206	1.0
129	5	3	2	1.60903	57.206	1.0
130	-7	0	3	1.59465	57.770	0.1
131	1	4	3	1.58789	58.039	0.2
132	1	2	7	1.58789	58.039	0.2
133	0	0	8	1.58388	58.200	0.2
134	3	4	1	1.57784	58.444	0.5
135	-3	4	1	1.57784	58.444	0.5
136	-5	2	5	1.56130	59.125	0.1
137	5	2	5	1.55545	59.369	0.5
138	-4	2	6	1.54926	59.630	0.7
139	-5	1	6	1.54926	59.630	0.7
140	1	3	6	1.54611	59.764	1.0
141	-1	3	6	1.54611	59.764	1.0
142	5	1	6	1.54374	59.865	1.0
143	4	2	6	1.54374	59.865	1.0
144	6	1	5	1.53059	60.433	3.0
145	1	1	8	1.53059	60.433	3.0
146	-6	2	4	1.52459	60.696	0.9
147	6	2	4	1.51950	60.921	2.0
148	0	4	4	1.51950	60.921	2.0
149	4	1	7	1.51049	61.323	0.1
150	6	3	1	1.50395	61.619	0.5
151	8	0	0	1.50395	61.619	0.5
152	4	4	0	1.50077	61.764	1.1
153	-3	2	7	1.49166	62.183	0.1
154	-4	3	5	1.48647	62.424	0.3
155	3	4	3	1.48647	62.424	0.3

156	-7	1	4	1.47883	62.783	2.1
157	-5	3	4	1.47652	62.893	1.0
158	2	4	4	1.47244	63.087	3.6
159	5	3	4	1.47244	63.087	3.6
160	-8	0	2	1.46483	63.453	0.3
161	4	4	2	1.45959	63.707	0.7
162	-8	1	1	1.45959	63.707	0.7
163	-3	3	6	1.45425	63.969	0.9
164	-5	0	7	1.45074	64.142	0.3
165	6	0	6	1.45074	64.142	0.3
166	-7	2	3	1.44849	64.254	0.5
167	-3	1	8	1.44316	64.520	2.1
168	5	0	7	1.44316	64.520	2.1
169	0	2	8	1.44041	64.658	1.5
170	3	1	8	1.43872	64.743	1.7
171	-7	0	5	1.42682	65.350	0.3
172	-6	3	3	1.42682	65.350	0.3
173	6	3	3	1.42456	65.466	0.4
174	0	3	7	1.42456	65.466	0.4
175	1	4	5	1.42024	65.691	0.2
176	-1	4	5	1.42024	65.691	0.2
177	-2	2	8	1.40217	66.647	0.2
178	-5	4	1	1.39874	66.831	0.8
179	4	0	8	1.39874	66.831	0.8
180	-8	1	3	1.39006	67.304	0.2
181	2	3	7	1.38508	67.579	0.5
182	8	1	3	1.38508	67.579	0.5
183	7	3	0	1.37969	67.878	0.2
184	0	1	9	1.37969	67.878	0.2
185	1	5	0	1.37717	68.020	0.2
186	0	5	1	1.37717	68.020	0.2
187	-8	0	4	1.36109	68.936	1.1
188	4	4	4	1.35503	69.288	2.3
189	8	0	4	1.35503	69.288	2.3
190	-3	4	5	1.34826	69.686	0.3
191	-7	3	2	1.34826	69.686	0.3
192	1	5	2	1.34507	69.875	0.5
193	-1	5	2	1.34507	69.875	0.5
194	2	5	1	1.34259	70.023	0.3
195	-2	5	1	1.34259	70.023	0.3
196	0	4	6	1.33908	70.234	0.2
197	6	2	6	1.33739	70.335	0.2
198	-5	2	7	1.33739	70.335	0.2

Stick Pattern



Calcita (AN)

Date: 9/8/2021 Time: 10:47:10 AM

File: HighScore Plus - Anhidrita

User: User

Name and formula

Reference code: 01-086-2334
Mineral name: Calcite
Compound name: Calcium Carbonate
PDF index name: Calcium Carbonate
Empirical formula: CCaO_3
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$
Mineral classification: Calcite (Supergroup), calcite (Group)

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167
a (Å): 4.9880
b (Å): 4.9880
c (Å): 17.0610
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 120.0000
Volume of cell (10^6 pm^3): 367.61
Z: 6.00
RIR: 3.15

Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern
Subfiles: Cement and Hydration Product, Ceramic, Ceramic - Bioceramic, Common Phase, Excipient, Forensic, Inorganic, Mineral, Mineral - Mineral, Mineral - Natural, Pharmaceutical, Pigment/Dye, Superconducting Material
Quality: Star (S)

Comments

ANX: ABX3
ICSD collection code: 40107
Creation Date: 9/1/2000
Modification Date: 9/1/2011
Cross-References: ICSD:40107
ANX: ABX3
Analysis: C1 Ca1 O3
Formula from original source: Ca (C O3)
ICSD Collection Code: 40107
Calculated Pattern Original Remarks: Also rigid body refinement of CO3-group (R=0.022)
Thermal expansion coeff.*1000000/C: for a: -2.8, for c: 32.3. Stable up to 1260 K (3rd ref., Tomaszewski), above R3-m, m.p. 1520 K. Sample Source or Locality: Specimen from Guam (cement infilling in a mollusk shell). Temperature of Data Collection: 297 K. Wyckoff Sequence: e b a(R3-CH). Unit Cell Data Source: Single Crystal.

References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++, (2004)
Structure: Markgraf, S.A., Reeder, R.J., *Am. Mineral.*, **70**, 590, (1985)

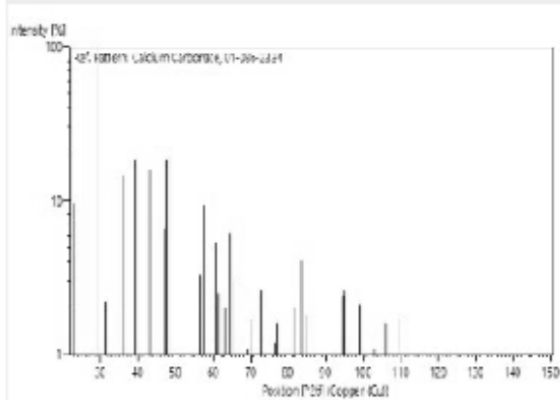
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [°]	I [%]
1	0	1	2	3.85379	23.060	9.6
2	1	0	4	3.03507	29.405	100.0
3	0	0	6	2.84350	31.435	2.2
4	1	1	0	2.49400	35.981	14.8
5	1	1	3	2.28402	39.420	18.6

1 Of 3

6	2	0	2	2.09380	43.172	15.8
7	0	2	4	1.92690	47.126	6.6
8	0	1	8	1.91228	47.509	18.6
9	1	1	6	1.87498	48.514	19.5
10	2	1	1	1.62528	56.582	3.3
11	1	2	2	1.60360	57.417	9.4
12	1	0	10	1.58682	58.082	0.8
13	2	1	4	1.52481	60.686	5.3
14	2	0	8	1.51753	61.008	2.1
15	1	1	9	1.50919	61.382	2.5
16	1	2	5	1.47279	63.070	2.0
17	3	0	0	1.43991	64.683	6.1
18	0	0	12	1.42175	65.612	3.0
19	2	1	7	1.35647	69.204	1.1
20	0	2	10	1.33880	70.250	1.7
21	1	2	8	1.29640	72.909	2.6
22	3	0	6	1.28460	73.688	0.6
23	2	2	0	1.24700	76.300	1.2
24	1	1	12	1.23515	77.166	1.6
25	2	2	3	1.21806	78.455	0.1
26	1	3	1	1.19514	80.260	0.1
27	3	1	2	1.18643	80.971	0.5
28	2	1	10	1.17959	81.540	2.0
29	0	1	14	1.17286	82.108	0.2
30	1	3	4	1.15344	83.799	4.1
31	2	2	6	1.14201	84.832	1.8
32	3	1	5	1.13042	85.911	0.1
33	1	2	11	1.12450	86.474	0.4
34	1	3	7	1.07520	91.520	0.1
35	0	4	2	1.07138	91.940	0.1
36	2	0	14	1.06136	93.065	0.6
37	4	0	4	1.04690	94.748	2.4
38	3	1	8	1.04453	95.031	2.6
39	1	1	15	1.03524	96.160	1.0
40	1	0	16	1.03524	96.160	1.0
41	2	1	13	1.02290	97.711	0.2
42	0	3	12	1.01169	99.175	2.1
43	3	2	1	0.98935	102.264	0.3
44	2	3	2	0.98440	102.982	1.1
45	1	3	10	0.98048	103.560	0.2
46	1	2	14	0.97660	104.138	0.7
47	3	2	4	0.96530	105.877	0.9
48	0	4	8	0.96345	106.169	1.6
49	0	2	16	0.95614	107.343	0.3
50	2	3	5	0.95169	108.075	0.2
51	0	0	18	0.94815	108.667	0.1
52	3	1	11	0.94815	108.667	0.1
53	4	1	0	0.94264	109.605	1.7
54	2	2	12	0.93749	110.502	0.7
55	4	1	3	0.92996	111.853	0.1
56	3	2	7	0.91803	114.086	0.2
57	4	0	10	0.91249	115.166	0.1
58	2	3	8	0.89872	117.987	0.6
59	1	4	6	0.89476	118.836	0.6
60	2	1	16	0.89278	119.267	0.5
61	1	1	18	0.88601	120.779	0.5
62	5	0	2	0.85955	127.317	0.2
63	3	2	10	0.85694	128.027	0.6
64	1	2	17	0.85498	128.567	0.2
65	3	1	14	0.85435	128.744	0.1
66	0	5	4	0.84675	130.931	0.6
67	4	1	9	0.84405	131.741	0.1
68	2	2	15	0.84034	132.882	0.1
69	0	1	20	0.83689	133.979	0.4
70	2	3	11	0.83510	134.560	0.1
71	3	3	0	0.83133	135.817	0.4
72	3	3	3	0.82259	138.921	0.1
73	2	4	1	0.81542	141.701	0.1
74	4	2	2	0.81264	142.846	0.7
75	0	4	14	0.80824	144.749	0.1
76	2	4	4	0.80180	147.773	0.7
77	5	0	8	0.80074	148.304	0.5
78	3	3	6	0.79793	149.755	0.7

Stick Pattern



Calcita (EAH)

Date: 9/8/2021 Time: 10:21:02 AM

File: HighScore Plus - Escoria EAH

User: User

Name and formula

Reference code: 01-078-3262
Mineral name: Calcite
Compound name: Calcium Carbonate
PDF index name: Calcium Carbonate
Empirical formula: CaCO_3
Chemical formula: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$
Mineral classification: Calcite (Supergroup), calcite (Group)

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
Space group: R-3c
Space group number: 167
a (Å): 5.0001
b (Å): 5.0001
c (Å): 17.0950
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 120.0000
Volume of cell (10^6 pm^3): 370.13
Z: 6.00
RIR: 3.21

Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern
Subfiles: Cement and Hydration Product, Ceramic, Ceramic - Bioceramic, Common Phase, Excipient, Forensic, Inorganic, Mineral, Mineral - Mineral, Mineral - Natural, Pharmaceutical, Superconducting Material
Quality: Indexed (I)

Comments

ANX: ABX3
ICSD collection code: 164935
Creation Date: 9/1/2011
Cross-References: ICSD:164935
ANX: ABX3
Analysis: Cl Ca1 O3
Formula from original source: Ca (C O3)
ICSD Collection Code: 164935
Calculated Pattern Original Remarks: a(D) corrected from 0 into 0.25
Minor Warning: Minor test comments from ICSD exist. No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension. No R factors reported/abstracted
Wyckoff Sequence: e b a (R3-CI)
Unit Cell Data Source: Single Crystal.

References

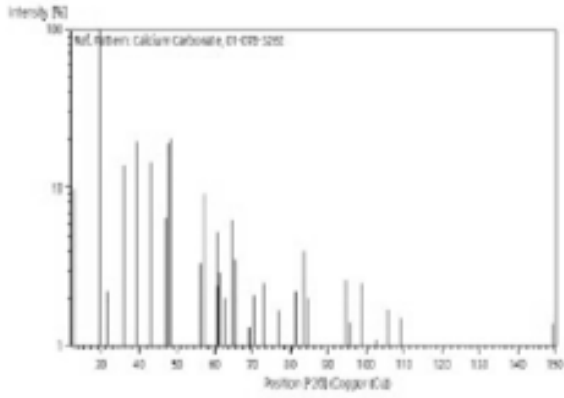
Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++
Structure: Sleight, A.W., Frewitt, C.T., Mater. Res. Bull., 5, 207, (1970)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [°]	I [%]
1	0	1	2	3.86280	23.005	9.8
2	1	0	4	3.04176	29.339	100.0
3	0	0	6	2.84917	31.371	2.2
4	1	1	0	2.50005	35.891	13.9
5	1	1	3	2.28940	39.323	19.5
6	2	0	2	2.09882	43.063	14.5

7	0	2	4	1.53140	47.010	6.4
8	0	1	8	1.51625	47.404	18.8
9	1	1	6	1.87918	48.399	20.5
10	2	1	1	1.62922	56.433	3.3
11	1	2	2	1.60746	57.267	9.2
12	1	0	10	1.59007	57.952	1.0
13	2	1	4	1.52942	60.528	5.2
14	2	0	8	1.52088	60.860	2.4
15	1	1	9	1.51244	61.236	2.9
16	1	2	5	1.47624	62.906	2.0
17	3	0	0	1.44340	64.507	6.3
18	0	0	12	1.42458	65.465	3.5
19	2	1	7	1.35958	69.023	1.3
20	0	2	10	1.34170	70.076	2.1
21	1	2	8	1.29934	72.717	2.5
22	0	3	6	1.28760	73.488	0.5
23	2	2	0	1.25003	76.082	1.0
24	1	1	12	1.23774	76.975	1.7
25	2	2	3	1.22099	78.230	0.1
26	1	3	1	1.19803	80.027	0.1
27	3	1	2	1.18930	80.735	0.5
28	2	1	10	1.18221	81.321	2.2
29	0	1	14	1.17524	81.906	0.3
30	1	3	4	1.15620	83.554	4.0
31	2	2	6	1.14470	84.587	2.0
32	3	1	5	1.13311	85.658	0.1
33	1	2	11	1.12697	86.238	0.5
34	1	3	7	1.07772	91.245	0.1
35	0	4	2	1.07397	91.655	0.1
36	2	0	14	1.06358	92.813	0.7
37	4	0	4	1.04941	94.451	2.4
38	3	1	8	1.04696	94.741	2.6
39	1	1	15	1.03733	95.903	1.4
40	1	0	16	1.03733	95.903	1.4
41	2	1	13	1.02511	97.429	0.3
42	0	3	12	1.01392	98.880	2.5
43	3	2	1	0.99175	101.921	0.3
44	2	3	2	0.98678	102.635	1.1
45	1	3	10	0.98271	103.229	0.3
46	1	2	14	0.97870	103.824	1.0
47	3	2	4	0.96762	105.514	0.8
48	0	4	8	0.96570	105.814	1.7
49	0	2	16	0.95812	107.021	0.4
50	2	3	5	0.95397	107.699	0.3
51	0	0	18	0.94972	108.403	0.1
52	3	1	11	0.94972	108.403	0.1
53	4	1	0	0.94493	109.213	1.5
54	2	2	12	0.93959	110.134	0.7
55	1	4	3	0.93220	111.446	0.1
56	3	2	7	0.92020	113.670	0.2
57	4	0	10	0.91459	114.753	0.1
58	2	3	8	0.90083	117.541	0.6
59	4	1	6	0.89689	118.376	0.6
60	2	1	16	0.89467	118.854	0.7
61	1	1	18	0.88762	120.369	0.9
62	5	0	2	0.88163	126.761	0.2
63	3	2	10	0.85892	127.487	0.8
64	1	2	17	0.85679	128.068	0.2
65	3	1	14	0.85624	128.219	0.2
66	0	5	4	0.84879	130.331	0.6
67	1	4	9	0.84602	131.147	0.1
68	2	2	15	0.84218	132.311	0.1
69	0	1	20	0.83857	133.441	0.7
70	2	3	11	0.83702	133.936	0.2
71	3	3	0	0.83335	135.138	0.4
72	3	3	3	0.82458	138.190	0.1
73	2	4	1	0.81740	140.911	0.1
74	4	2	2	0.81461	142.031	0.7
75	0	4	14	0.81005	143.954	0.1
76	2	4	4	0.80373	146.832	0.6
77	5	0	8	0.80263	147.365	0.6
78	3	3	6	0.79984	148.760	0.6
79	1	3	16	0.79826	149.578	1.4

Stick Pattern



Óxido de silicio (AS)

Date: 9/15/2021 Time: 12:00:38 PM

File: HighScore Plus - Aerogel AS

User: User

Name and formula

Reference code: 01-077-8675
Compound name: Silicon Oxide
Common name: Cristobalite beta, syn
PDF Index name: Silicon Oxide
Empirical formula: O₂Si
Chemical formula: SiO₂

Crystallographic parameters

Crystal system: Cubic
Space group: Fd-3m
Space group number: 227
a (Å): 7.1473
b (Å): 7.1473
c (Å): 7.1473
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000
Volume of cell (10⁶ pm³): 365.11
Z: 8.00
RIR: 5.47

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature, Alternate Pattern
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic, Excipient, Forensic, Inorganic, Minerals, Pharmaceutical
Quality: Blank (B)

Comments

ANIC: AX2
ICSD collection code: 162666
Creation Date: 9/1/2011
Modification Date: 9/1/2013
Cross-References: ICSD:162666
ANIC: AX2
Analysis: O2 Si1
Formula from original source: Si O2
ICSD Collection Code: 162666
Calculated Pattern Original Remarks: The material consists of disordered Fd32 units (ICSD 162666) with different orientations; effectively O atoms appear to be disordered over the 96 h positions
Sample Source or Locality: synthetic
Temperature of Data Collection: 1173 K
Minor Warning: No e.s.d reported/abstracted on the cell dimension
Wyckoff Sequence: h a (FD3-M5)
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction.

References

Primary reference: Calculated from ICSD using POWD-12++
Structure: Wright, A.F., Leadbetter, A.J., Philos. Mag., 31, 1391, (1975)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2θ [°]	I [%]
1	1	1	1	4.12650	21.517	100.0
2	2	2	0	2.52695	35.496	15.8
3	3	1	1	2.15499	41.887	1.2
4	2	2	2	2.06325	43.844	3.6
5	4	0	0	1.78682	51.075	0.3

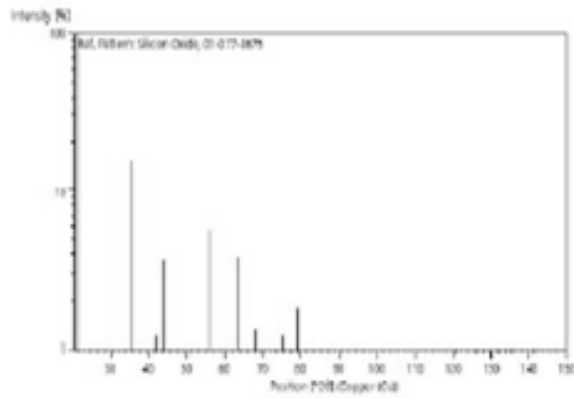
Date: 9/15/2021 Time: 12:00:38 PM

File: HighScore Plus - Aerogel AS

User: User

6	3	3	1	1.63970	56.040	5.6
7	4	2	2	1.45894	63.739	3.8
8	5	1	1	1.37550	68.114	1.3
9	4	4	0	1.26348	75.131	1.2
10	5	3	1	1.20811	79.227	1.8
11	4	4	2	1.19122	80.579	0.1
12	6	2	0	1.13009	85.942	0.9
13	5	3	3	1.08995	89.939	0.1
14	6	2	2	1.07750	91.269	0.1
15	4	4	4	1.03162	96.609	0.1
16	7	1	1	1.00082	100.648	0.3
17	6	4	2	0.95510	107.513	0.3
18	7	3	1	0.93050	111.754	0.3
19	8	0	0	0.89341	119.129	0.1
20	7	3	3	0.87318	123.812	0.1
21	6	4	4	0.86674	125.429	0.1
22	8	2	2	0.84232	132.270	0.1
23	7	5	1	0.82530	137.929	0.1
24	6	6	2	0.81985	139.955	0.1
25	8	4	0	0.79909	149.145	0.1

Stick Pattern



Óxido de silicio (MS)

Name and formula

Reference code: 01-076-0940

Compound name: Silicon Oxide
Common name: Cristobalite low
PDF index name: Silicon Oxide

Empirical formula: O_2Si
Chemical formula: SiO_2

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal
Space group: P41212
Space group number: 92

a (Å): 4.9964
b (Å): 4.9964
c (Å): 7.0169
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm³): 175.17
Z: 4.00

RIR: 5.08

Status, subfiles and quality

Status: Diffraction data collected at non ambient temperature, Alameda Pattern Alloy, metal or intermetallic, Cement and Hydration Product, Common Phase, Explant, Forensic, Inorganic, Mineral, Pharmaceutical

Subfiles: Indexed (1)

Quality: Indexed (1)

Comments

ANCI: AX2
ICSD collection code: 34932
Creation Date: 9/1/1998
Modification Date: 9/1/2011
Cross-References: ICSD:34932
ANCI: AX2
Analysis: O2 Si1
Formula from original source: Si O2
ICSD Collection Code: 34932
Calculated Pattern Original Remarks: Metastable up to 500 K (2nd ~~ed.~~ Tomaszewski), above Pd3-m
Sample Source or Locality: Specimen from Ellora Caves, India
Temperature of Data Collection: 483 K
Minor Warning: No a.s.d reported/abstracted on the cell dimension
Wyckoff Sequence: b a(P41212)
Unit Cell Data Source: Single Crystal.

References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12+.* (2004)
Structure: Peacor, D.R., *J. Crystallogr., Kristallograv., Kristalphys., Kristallchem.*, **138**, 274, (1973)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2 θ [°]	I [%]
1	1	0	1	4.07003	21.819	100.0
2	1	1	0	3.53299	25.187	0.5
3	1	1	1	3.15557	28.258	7.5
4	1	0	2	2.87127	31.124	8.9
5	2	0	0	2.49820	35.919	11.9
6	1	1	2	2.48948	36.049	6.2
7	2	0	1	2.33349	38.210	0.2
8	2	1	0	2.23446	40.331	0.1

9	2	1	1	2.12911	42.421	2.4
10	1	0	3	2.11834	42.647	0.3
11	2	0	2	2.03502	44.484	2.5
12	1	1	3	1.95030	46.528	4.1
13	2	1	2	1.88469	48.248	4.2
14	2	2	0	1.76649	51.706	0.4
15	0	0	4	1.75423	52.094	0.6
16	2	0	3	1.70742	53.635	2.0
17	1	0	4	1.65517	55.471	0.4
18	3	0	1	1.62045	56.766	3.3
19	2	1	3	1.61568	56.949	1.9
20	3	1	0	1.58000	58.357	0.3
21	2	2	2	1.57779	58.447	0.3
22	1	1	4	1.57120	58.716	0.1
23	3	1	1	1.54141	59.965	1.9
24	3	0	2	1.50455	61.592	1.9
25	3	1	2	1.44065	64.646	2.6
26	2	0	4	1.43563	64.899	1.5
27	2	2	3	1.40064	66.248	1.1
28	3	2	0	1.38575	67.542	0.1
29	2	1	4	1.37981	67.872	1.8
30	3	2	1	1.35949	69.028	0.9
31	3	0	3	1.35668	69.191	0.7
32	1	0	5	1.35110	69.518	1.3
33	3	1	3	1.30927	72.079	1.4
34	1	1	5	1.30425	72.400	0.1
35	3	2	2	1.28886	73.405	1.5
36	4	0	0	1.24910	76.149	0.1
37	2	2	4	1.24474	76.463	0.8
38	4	0	1	1.22977	77.567	0.9
39	2	0	5	1.22394	78.036	0.1
40	4	1	0	1.21181	78.938	1.3
41	3	2	3	1.19222	80.497	1.2
42	2	1	5	1.18843	80.807	1.2
43	3	3	0	1.17766	81.702	0.2
44	4	0	2	1.17675	81.778	0.2
45	3	1	4	1.17401	82.010	0.5
46	3	3	1	1.16142	83.095	0.3
47	4	1	2	1.14541	84.522	0.2
48	3	3	2	1.11645	87.253	0.4
49	4	2	0	1.11645	87.253	0.4
50	1	1	6	1.11024	87.865	1.1
51	4	2	1	1.10333	88.539	0.8
52	4	0	3	1.10182	88.712	0.2
53	2	2	5	1.09883	89.017	0.2
54	3	2	4	1.08740	90.208	0.2
55	4	1	3	1.07597	91.436	0.2
56	3	0	5	1.07318	91.742	0.1
57	4	2	2	1.06436	92.702	0.3
58	2	0	6	1.05917	93.315	0.1
59	3	3	3	1.05186	94.163	0.1
60	3	1	5	1.04925	94.470	0.3
61	2	1	6	1.03615	96.048	0.1
62	4	0	4	1.01751	98.408	0.1
63	4	2	3	1.00813	99.652	0.2
64	4	3	0	0.99928	100.861	0.3
65	4	1	4	0.99704	101.173	0.6
66	4	3	1	0.98930	102.271	0.3
67	3	2	5	0.98605	102.741	0.1
68	1	0	7	0.98283	103.212	0.2
69	5	1	0	0.97988	103.649	0.1
70	3	3	4	0.97777	103.964	0.1
71	2	2	6	0.97515	104.338	0.1
72	5	1	1	0.97046	105.074	0.2
73	5	0	2	0.96106	106.549	0.4
74	3	0	6	0.95700	107.189	0.2
75	4	2	4	0.94234	109.657	0.1

76	3	1	6	0.94000	110.063	0.2
77	4	0	5	0.93304	111.294	0.1
78	2	0	7	0.93032	111.787	0.1
79	5	2	0	0.92781	112.246	0.1
80	5	2	1	0.91980	113.746	0.1
81	4	3	3	0.91893	113.913	0.3
82	4	1	5	0.91719	114.248	0.1
83	2	1	7	0.91460	114.752	0.4
84	5	1	3	0.90377	116.929	0.1
85	3	3	5	0.90211	117.273	0.1
86	5	2	2	0.89697	118.319	0.3
87	3	2	6	0.89375	119.056	0.2
88	4	4	0	0.88325	121.412	0.1
89	0	0	8	0.87711	122.857	0.1
90	4	4	1	0.87633	123.045	0.1
91	4	2	5	0.87407	123.594	0.2
92	2	2	7	0.87183	124.146	0.1
93	5	0	4	0.86829	125.034	0.2
94	1	0	8	0.86390	126.163	0.1
95	5	2	3	0.86243	126.548	0.1
96	3	0	7	0.85885	127.506	0.1
97	4	4	2	0.85652	128.141	0.3
98	5	3	0	0.85652	128.141	0.3
99	5	1	4	0.85546	128.433	0.1
100	4	0	6	0.85371	128.923	0.1
101	5	3	1	0.85056	129.819	0.1
102	3	1	7	0.84644	131.025	0.1
103	4	1	6	0.84151	132.517	0.1
104	5	3	2	0.83241	135.453	0.1
105	6	0	0	0.83241	135.453	0.1
106	2	0	8	0.82759	137.113	0.2
107	6	0	1	0.82693	137.345	0.2
108	6	1	0	0.82140	139.366	0.3
109	5	2	4	0.82016	139.838	0.1
110	2	1	8	0.81646	141.282	0.3
111	5	0	5	0.81401	142.278	0.1
112	3	2	7	0.81219	143.034	0.1
113	6	0	2	0.81022	143.877	0.1
114	4	2	6	0.80784	144.928	0.1
115	5	3	3	0.80458	146.428	0.1
116	5	1	5	0.80341	146.985	0.5
117	6	1	2	0.79978	148.792	0.1

Stick Pattern

