

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**VIDRIO ESPUMA A PARTIR DE DESECHO DE VIDRIO Y PERLITA
MINERAL COMO AISLANTE TÉRMICO**

POR:

EVELYN DENISSE FERNANDEZ CAMPOS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

con orientación en Procesos Sustentables

DICIEMBRE 2021



VIDRIO ESPUMA A PARTIR DE DESECHO DE VIDRIO Y PERLITA
MINERAL COMO AISLANTE TÉRMICO

Revisión de la tesis:

Dra. Anabel Álvarez Méndez
Directora de Tesis

Dr. Juan Jacobo Ruiz Valdés
Codirector de Tesis

Dra. Astrid Iriana Sánchez Vázquez
Evaluadora de Tesis

Dra. Shadai Lugo Loreda
Evaluadora de Tesis

Dr. Jorge Ibarra Rodríguez
Evaluador de Tesis



RESUMEN

Evelyn Denisse Fernandez Campos **Fecha de graduación: diciembre 2021**

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del Estudio: VIDRIO ESPUMA A PARTIR DE DESECHO DE VIDRIO Y PERLITA MINERAL COMO AISLANTE TÉRMICO

Número de páginas: 102

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Procesos Sustentables

Área de Estudio: Procesos Sustentables

Propósito y Método de estudio: El propósito de este estudio fue verificar la factibilidad del uso de residuos electrónicos, industriales y sólidos urbanos para la fabricación de un vidrio espuma que fuera termoaislante y con aplicación como material de construcción, además de realizar una caracterización de este. Desde el comienzo, se procedió a establecer las composiciones de los vidrios espuma con la materia prima recolectada, se analizaron las fases cristalinas y componentes de cada una y con esto, se partió a establecer las condiciones del tratamiento térmico. Al obtener los vidrios espuma, se les caracterizó por medio de DRX, absorción de agua, conductividad térmica, resistencia a la compresión y análisis de distribución de poro.

Conclusiones y contribuciones: La viabilidad del uso de residuos o desechos industriales, sólidos urbanos y electrónicos para la fabricación de un vidrio espuma se comprobó obteniendo un vidrio espuma sinterizado (VES) con una composición de 80 %p VCRT y 20 %p PM, una densidad aparente de 0.69 g/cm³, una porosidad aparente del 37% y un diámetro de poro de 0.049 cm, las cuales fueron las propiedades adecuadas para obtener un vidrio espuma con una conductividad térmica de 0.085 W/m*K y una resistencia a la compresión de 3.48 MPa. El uso de este tipo de residuos representa una alternativa sustentable para contrarrestar el daño causado por la extracción de materia prima virgen.

FIRMA DEL ASESOR (A):

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quisiera agradecerle a Dios por ayudarme a salir adelante estos dos años, así como por darme la fuerza para nunca rendirme y siempre seguir adelante con cualquier obstáculo que se presentará.

A mis papás y hermano, Jorge Fernandez, Patricia Campos, Alexis Fernandez; por estar siempre ahí cuando los necesitaba, por ayudarme a seleccionar lo que fuera mejor para mí, por aguantarme haciéndoles preguntas, pero sobre todo por apoyarme en cada paso que di y/o daré a lo largo de mi vida.

A mi novio, Nando Moreno, por acompañarme en esta nueva meta de mi vida y alentarme a seguir adelante, además, de entenderme cada vez que me encontrará en un momento complicado u ocupado, pero seguir cuidándome y preocupándose por mí. Por esta y muchos más metas juntos.

A mi mejor amigo y compañero de aventuras, Manuel Cerda, por estar siempre conmigo, apoyándome, escuchándome, dándonos ideas, ingeniándonoslas para los obstáculos que se presentaban, pero sobre todo por hacer que fuera más divertido, placentero y por todo el aprendizaje y aventuras que hemos tenido juntos. Gracias por compartir de nuevo esta meta de nuestras vidas, así como hacer más ameno el trayecto vivido.

A mi asesora, la Dra. Anabel Álvarez Méndez, por ser una docente y asesora increíble, por su apoyo, orientación y paciencia durante todo este periodo de maestría, así como por brindarme la oportunidad de ser su alumna de tesis. A mi Co-Asesor, el Dr. Juan Jacobo Ruíz Valdés, que, desde Servicio Social, ha estado ahí cada vez que lo he necesitado; por su apoyo y preocupación, asimismo por alentarme a entrar a este nuevo y maravilloso reto en mi vida.

A mi comité tutorial, la Dra. Astrid Sánchez, la Dra. Shadai Lugo y al Dr. Jorge Ibarra, por todo su sustento, orientación y porque siempre me exigieron ser mejor para obtener mi mayor potencial, así como sus consejos hacia este proyecto.



Al Dr. Zaldívar de la Facultad de Ingeniería Civil por los equipos y pruebas prestados y realizados en sus instalaciones. De igual manera, agradecerle al M.C. Daniel Lardizábal por todas sus atenciones, por ayudarme a sacar adelante las pruebas restantes de este proyecto y por estar atento a cualquier duda que tuviera.

A mis amigos de generación: Claudia, Evelyn, Kenia, Saúl, Cris, Edwin, Ayrton y Misael, por su compañerismo, amistad y apoyo en el laboratorio, pero sobre todo por todas las horas de clases, tareas y trabajo que hicieron más agradables gracias a su compañía, les deseo el mejor de los éxitos en su vida personal y profesional.

A los muchachos de estancia y servicio social: Annia, América, Felipe, Norma y Jorge Esparza, por ayudarme y apoyarme con su conocimiento, esfuerzo y búsqueda a lo largo de este proyecto, les deseo mucho éxito en todo lo que se propongan.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ciencias Químicas y al *The Tile Council of North America (TCNA)* por darme la oportunidad de realizar la maestría y por la prestación de sus instalaciones y equipo para el cumplimiento de este proyecto. Asimismo, agradecerle a CONACYT por el apoyo económico otorgado.

*“Sigue tu camino, incluso si vives por un día,
haz algo, deja de lado tu debilidad”*

– No More Dream, BTS

**TABLA DE CONTENIDO**

CAPÍTULO	PÁGINA
LISTA DE TABLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
SIGLAS Y ABREVIATURAS	xiv
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Residuos sólidos urbanos y electrónicos en México	1
1.2. Perlita mineral y su producción en México.....	2
1.3. La construcción en México.....	5
1.4. Materiales térmicamente aislantes.....	6
1.5. Material a base de desechos: Vidrio Espuma	10
CAPÍTULO 2	14
2. ANTECEDENTES	14
2.1. Historia del vidrio espuma.....	14
2.2. Antecedentes en la Investigación del Vidrio espuma a base de residuos	15
2.3. Antecedentes en la Investigación de la Perlita Mineral como materia prima para materiales aislantes.....	22
2.4. Análisis Crítico de Literatura	26



CAPÍTULO 3	28
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVO DEL PROYECTO	28
3.1. Hipótesis	28
3.2. Objetivos	28
3.2.1. Objetivo General	28
3.2.2. Objetivos Específicos	28
3.3. Aportación Científica	29
CAPÍTULO 4	30
4. METODOLOGÍA	30
4.1. Recolección y Preparación de la muestra	30
4.2. Caracterización de las materias primas	32
4.2.1. Análisis Cristalográfico por Difracción de Rayos-X, DRX.	32
4.2.2. Análisis Elemental por Fluorescencia de Rayos-X, FRX..	34
4.2.3. Análisis Térmico Diferencial y Termogravimétrico, DTA/TGA.	34
4.3. Preparación del material	35
4.4. Disposición de residuos	38
4.5. Sinterización del Vidrio espuma	38
4.6. Caracterización del Vidrio espuma sinterizado	40
4.6.1. Análisis Cristalográfico, DRX.	40
4.6.2. Absorción de agua, ASTM C373.....	40



4.6.3. Análisis de distribución y tamaño de poro.....	44
4.6.4. Análisis de Conductividad Térmica.	45
4.6.5. Análisis mecánico, Resistencia a la compresión, RC.....	49
CAPÍTULO 5.....	52
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
5.1. Caracterización de materia prima	52
5.1.1. Análisis Cristalográfico, DRX.	52
5.1.2. Análisis Elemental, FRX.....	54
5.1.3. Análisis térmico, DTA/TG.....	57
5.2. Selección de Agente Estabilizador de Espuma, AEE	59
5.3. Selección de Agente Aglomerante, AA	65
5.4. Sinterización del Vidrio Espuma	69
5.5. Caracterización de Vidrio espuma sinterizado	69
5.5.1. Absorción de agua, ASTM C373.....	69
5.5.2. Análisis Cristalográfico, DRX.	73
5.5.3. Análisis de distribución y tamaño de poro.....	75
5.5.4. Análisis de Conductividad Térmica.	81
5.5.5. Análisis mecánico, RC.	85
CAPÍTULO 6.....	88
6. CONCLUSIONES.....	88
6.1. Conclusiones	88



CAPÍTULO 7	91
7. PROSPECTIVA FUTURA	91
CAPÍTULO 8	93
8. REFERENCIAS.....	93



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composiciones de cada batch.....	36
Tabla 2. Diseño de experimentos de bloques.	40
Tabla 3. Dimensiones de los VES para el Análisis de Conductividad Térmica.	47
Tabla 4. Análisis de FRX de la ES.....	56
Tabla 5. Composición del vidrio espuma para la selección de AEE.....	60
Tabla 6. Análisis de Absorción de agua con diferente AEE.....	61
Tabla 7. Composición del vidrio espuma para la Selección de AA.....	66
Tabla 8. Análisis de Absorción de agua para el AA de PVA.....	66
Tabla 9. Resultados del diámetro de poro presentado en los VES.	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción Nacional Anual de Perlita Mineral en México. ^[11]	4
Figura 2. Fibras minerales para aislamiento térmico.....	8
Figura 3. Aislante térmico granular: perlita a granel y miga de relleno.....	8
Figura 4. Aislante térmico celular: Vidrio celular.	9
Figura 5. Televisión marca PHILIPS usada para obtener el VCRT.....	30
Figura 6. Molinos utilizados para la preparación de materia prima; a) Molino vibratorio RockLabs, b) Molino de bolas Wisd.	32
Figura 7. Difractómetro, Bruker AXS, D2 Phaser.	33
Figura 8. Prensa Hidráulica, Carver 4350-L.....	37
Figura 9. Molde metálico usado para el prensado de polvos.	37
Figura 10. Horno de convección, Thermo Scientific Heratherm, OGS-180.	38
Figura 11. Mufla Carbolite, CWF-1300.....	39
Figura 12. Equipo ISO-VACUUM, Gabbriellui, GT-1907.....	42
Figura 13. Balanza analítica, AND, HR-120.....	43
Figura 14. Balanza digital, Ohaus Pioneer, PA 3102C.....	43
Figura 15. Equipo de conductividad térmica: a) Esquema del equipo (referencia ASTM E1530), b) Anter Unitherm modelo 2022.	46
Figura 16. Cortadora de baja velocidad Struers, Minitom.	50
Figura 17. Máquina de ensayos universal INSTRON 5985.....	51
Figura 18. Difractograma obtenido del análisis de VCRT.	52
Figura 19. Difractograma obtenido del análisis de PM. Biotita (KFeMg ₂ (AlSi ₃ O ₁₀) (OH ₂)) #01-080-1110.....	53



Figura 20. Difractograma obtenido del análisis de ES. Carbonato de Calcio (CaCO ₃) #01-086-2334.....	54
Figura 21. Análisis de FRX para VCRT y PM.....	55
Figura 22. Análisis térmico (DTA/TG) de las materias primas. VCRT [=] Vidrio de tubos de rayos catódicos, PM [=] Perlita Mineral; ES [=] Cáscara de huevo.....	58
Figura 23. Porosidad presente en el VES sinterizado con Na ₃ PO ₄ ; a) P11, b) P12, c) P13.....	62
Figura 24. Porosidad presente en el VES sinterizado con MnO ₂ ; a) P21, b) P22, c) P23.....	63
Figura 25. Distribución de tamaño de poros en el VES con Na ₃ PO ₄ como AEE.	64
Figura 26. Distribución de tamaño de poros en el VES con MnO ₂ como AEE.	65
Figura 27. Porosidad presente en el VES sinterizado con PVA; a) PVA1, b) PVA2, c) PVA3.	67
Figura 28. Distribución de tamaño de poro en el VES con AA de PVA.....	68
Figura 29. VES con diferentes composiciones y temperaturas.....	69
Figura 30. Densidad aparente presente en los VES a diferentes temperaturas y composición.....	71
Figura 31. Porosidad aparente presente en los VES a diferentes temperaturas y composiciones.	72
Figura 32. Difractograma obtenido del análisis de los VES con las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C. Óxido de silicio (SiO ₂ , #00-	



050-1703), óxido de manganeso sódico ($\text{Na}_{0.70}\text{MnO}_2$, #00-027-0751) y calcita magnésica ($(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$, #01-086-2335)	74
Figura 33. Distribución del tamaño de poro para las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C.	76
Figura 34. Prueba de Normalidad para la composición A a 750 °C. (Gráfica arrojada por Minitab).....	79
Figura 35. Prueba de Normalidad para la composición B a 750 °C. (Gráfica arrojada por Minitab).....	80
Figura 36. Prueba de Normalidad para la composición C a 800 °C. (Gráfica arrojada por Minitab).....	81
Figura 37. Análisis de Conductividad térmica para las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C.	82
Figura 38. Resistencia a la compresión de las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C.	85
Figura 39. Mapeo de poros en cada composición. a) Composición a A 750 °C, b) Composición B 750 °C y c) Composición C 800 °C.....	87



SIGLAS Y ABREVIATURAS

%p	Porcentaje en peso
Á	Amperes
AA	Agente Aglomerante
AEE	Agente estabilizador de espuma
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
B	Densidad aparente
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
CRT	Tubos de rayos catódicos
CT	Análisis de conductividad térmica
D	Peso seco
DRX	Difracción de rayos-X
DTA/TG	Análisis Térmico Diferencial / Termogravimetría
ES	Cáscara de huevo
EUA	Estados Unidos de América
FRX	Espectrometría de fluorescencia de rayos-X
h	Horas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
kV	Kilovolts
M	Peso saturado
mA	Miliamperios
mg	Miligramos
min	Minutos
mL	Mililitros
MP	Megapíxeles
P	Porosidad aparente
PM	Perlita Mineral
PVA	Alcohol Polivinílico
RC	Resistencia a la compresión
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
S	Peso suspendido
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales



ton	Toneladas
VCRT	Vidrio de CRT
VES	Vidrio espuma sinterizado
ΔH	Entalpía
μm	Micras o micrómetros

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Residuos sólidos urbanos y electrónicos en México

En la actualidad, uno de los principales problemas ambientales se debe a la gran cantidad de aparatos electrónicos que se desechan día con día, ya sea porque han llegado al final de su vida útil o simplemente, porque el usuario prefiere uno actualizado, esto nos ha llevado al nuevo tipo de residuo conocido como e-waste (electronic waste)^{[1][2]}. Estos residuos plantean graves problemas para el ambiente y la salud, debido a que contienen componentes peligrosos (principalmente plomo). En México, se generan alrededor de 29,000 toneladas de basura electrónica en promedio mensualmente, dato que presentó el Senado de la República en el año 2019^[3], lo cual es una gran cantidad que puede llegar a ser dañina si no se le da un tratamiento adecuado, es por esto que en los últimos años, se ha buscado la manera de reutilizar algunos de estos residuos como lo son los tubos de rayos catódicos (por sus siglas en inglés, cathode ray tube, CRT) de las televisiones.^[4]

Por otro lado, no solo los residuos electrónicos dañan a la salud y al ambiente, sino también los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), lo cuales son definidos como todo aquel desecho producido en casas habitación como

consecuencia de las actividades domésticas y según estadísticas de la SEMANART ^[5], publicadas en el año 2017, se generan 102,895 toneladas diariamente, de las cuales solamente el 9.6% son recicladas.

Una de las alternativas para la disminución de la contaminación ambiental emitida tanto por los residuos electrónicos como los RSU son reusarlos como materia prima en la creación de nuevos materiales de construcción, generando así un material amigable con el ambiente. De igual manera, la reutilización y el reciclaje de estos residuos disminuye el requerimiento energético y/o agua que sea necesaria para su extracción y tratamiento, además, de aportar positivamente al uso consciente y adecuado de nuestros recursos.

1.2. Perlita mineral y su producción en México

La perlita mineral es una roca volcánica silícea natural, es una forma amorfa de magma riolítico o dacítico que contiene entre 2% a 5% de agua y se compone principalmente de SiO_2 , Al_2O_3 y cantidades menores de varios óxidos metálicos como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio.^[6] Tras un calentamiento rápido (>20 °C/min) controlado a su temperatura de reblandecimiento (900 – 1200 °C), esta se expande de 5 a 20 veces su volumen original convirtiéndose en un material espuma de baja densidad aparente convirtiendo su agua atrapada en vapor.^[7] En su forma expandida, la perlita ofrece aislamiento térmico y acústico, así como, resistencia al fuego, entre otras propiedades deseables de acuerdo con la aplicación que se le quiera dar.^[8] El proceso de calentamiento no cambia la densidad de perlita

(2.2 – 2.3 kg/dm³) pero la densidad aparente disminuye a 60–80 g/dm³ con una conductividad térmica de 0.04 – 0.06 W/m*K. Durante los tratamientos térmicos, se produce una transición estructural de amorfo a cristalino, acompañada de una mayor capacidad de intercambio de cationes y un área superficial específica aumentada de 1.2 a 2.3 m²/g.^[9]

La roca natural de perlita puede variar de incoloro a gris claro o negro azabache, en cambio, el color de la perlita expandida varía de blanco a blanco grisáceo. La perlita expandida puede considerarse como una piedra pómez sintética, la cual tiene muchas ventajas sobre la piedra pómez natural, con un control del tiempo y la temperatura de calcinación, sus propiedades pueden regularse de acuerdo con las especificaciones de tamaño de grano y porosidad. La perlita expandida se ha utilizado ampliamente en la construcción, las industrias petroquímicas, los sectores industrial, químico y hortícola.^[8]

Algunos de los beneficios del uso de perlita expandida en distintos materiales, son aumentar la trabajabilidad, reducir el peso unitario, disminuir la contracción por secado, disminuir la conductividad térmica y aumentar el aislamiento acústico. Además, al usarla como parte de la materia prima para la construcción ayuda a disminuir la emisión de CO₂ a la atmósfera y reducir el consumo de recursos naturales.^[7]

Los depósitos de perlita se explotan normalmente mediante métodos de extracción a cielo abierto de bajo costo seguidos de molienda y tamizado *in situ*. Las reservas mundiales se estiman en 700 millones de toneladas, estas se encuentran en varios países del mundo.^[9] Grecia y Turquía son los principales productores mundiales con una producción anual de alrededor de

700,000 ton y 1,100,000 ton, respectivamente. Sin embargo, en México también se encuentran depósitos de perlita mineral.

Como bien se conoce, la industria de la minería y su cadena productiva, tienen una contribución importante en México agregando que la geografía del país es importante por su riqueza mineral.^[10]

México se encuentra dentro de los 13 principales productores a nivel mundial de 24 minerales como son la plata (Ag), fluorita (CaF₂), wollastonita (CaSiO₃), bismuto (Bi), celestita (SrSO₄), perlita, zeolita, entre otros. En el 2018, los minerales no metálicos (zeolita, sílice, perlita, grava, etc.) reflejaron un aumento en su extracción en México.^[11]

En la **Figura 1**, se refleja la producción anual de perlita en México a partir del año 2014.

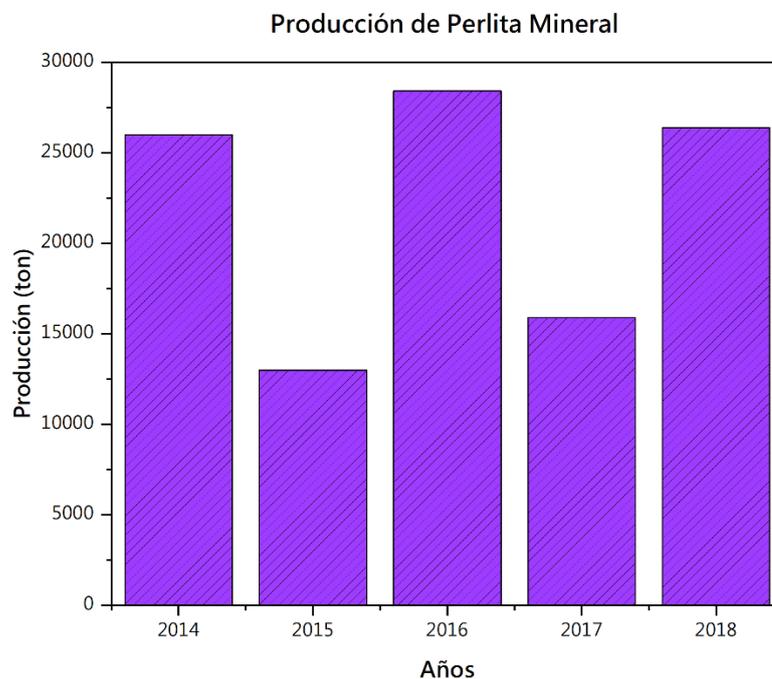


Figura 1. Producción Nacional Anual de Perlita Mineral en México.^[11]

La producción de perlita en el año 2018 fue de 26,400 toneladas dando \$47,459,491 pesos corriente por su comercialización, con una aportación de 17,400 ton por parte del estado de Puebla y 9,000 ton en el estado de Durango, siendo el primer y segundo lugar en producción nacional de perlita mineral, respectivamente.

Basado en el mercado de México, se puede decir que la perlita mineral tiene un papel muy importante dentro de los minerales no metálicos, además, al reusarla se ayudará al medio ambiente con la disminución de CO₂ por la disminución en su extracción y, de igual manera, al usarla como materia prima para su aplicación en la fabricación de materiales térmicamente aislantes para evitar el consumo energético excesivo.

1.3. La construcción en México

En los últimos años se ha observado un cambio en las construcciones residenciales, dando paso a un sinnúmero de modernizaciones que sean sustentables. El objetivo de crear materiales para la construcción que sean amigables al ambiente es reducir la energía consumida en las casas habitación ya que se gasta alrededor de un 16% de la demanda energética nacional ^[12], por lo que en las investigaciones enfocadas a la construcción se busca un material con baja conductividad térmica y una resistencia a la compresión alta para aplicarlo como un aislante térmico y pueda competir con los materiales actualmente utilizados.

En un estudio presentado por la Secretaria de Energía ^[12], se menciona que, de acuerdo con el análisis realizado por la Comisión Nacional para el Uso

Eficiente de la Energía (CONUEE), alrededor de un 30% de la energía consumida en residencias es debido al uso del aire acondicionado. El aire acondicionado se ha vuelto una necesidad debido al cambio climático que se manifiesta en altas temperaturas y por consecuencia, produciendo un gasto mayor de energía, lo que produce un aumento en los gases de efecto invernadero volviendo el problema aún más crítico. Esto define la importancia de buscar procesos de producción de materiales alternativos para disminuir el uso excesivo de energía que actualmente se presenta.

1.4. Materiales térmicamente aislantes

Los materiales térmicamente aislantes son primordiales en el ramo de la construcción, estos son necesarios para mantener temperaturas óptimas en el interior de las edificaciones. Desde el descubrimiento de los materiales hasta estos tiempos, se han fabricado muchos más con mejoras como avance en la arquitectura.

Los materiales aislantes se pueden definir como aquellos que presentan una elevada resistencia a las altas temperaturas, reduciendo la transferencia de calor, por lo que se dice que “protegen” del frío y del calor.

El aislamiento térmico contribuye a la eficiencia energética, la cual consiste en disminuir el consumo energético sin disminuir el confort en la edificación. La eficiencia energética es uno de los principales aspectos de la sostenibilidad, ya que se intenta equilibrar la demanda y el consumo consiguiendo un ahorro de energía.^[13]

El Código Técnico de la Edificación Europea, en el Documento Básico de Ahorro de Energía, define a los materiales térmicamente aislantes mediante su conductividad térmica (W/m^*K), el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ) así como la densidad (kg/m^3) y el calor específico (J/kg^*K) de cada uno.

Un aislante térmico es aquel material que tiene una conductividad térmica $<0.050 W/m^*K$ y una resistencia térmica $>0.25 m^2^*K/W$. Estos tipos de materiales cuentan con porosidad interior; esto supone una característica muy común de los materiales y junto con la baja conductividad térmica se les da el nombre de materiales aislantes.^[14]

Basados en las definiciones previamente mencionadas, un aislante térmico representa, primeramente, la disminución en gasto económico, porque al evitar la transmisión de calor, se evita el paso de energía del exterior al interior del edificio y este se mantiene en temperaturas adecuadas para el confort. Asimismo, al usar un aislante térmico su costo puede ser una gran inversión al inicio, pero al paso de los años podrá recuperarse, con el ahorro energético que se obtendrá.^[15]

Existen distintos tipos de aislantes térmicos, estos pueden ser clasificados por su forma o composición, de la siguiente manera:

- *Fibras minerales*: Materiales fabricados a partir de la fusión de roca, escoria o vidrio, lo cuales, a partir de un proceso de centrifugación a alta velocidad o dados de estirado, son convertidos a fibra. Las fibras minerales más usadas son la lana de escoria, de roca, fibra de vidrio y la fibra cerámica. (Ver **Figura 2**)



Figura 2. *Fibras minerales para aislamiento térmico.*

- *Aislantes térmicos granulares:* Materiales hechos por celdas individuales separadas entre sí. El material celular, conocido así por la presencia de cavidades o poros en él, se puede fabricar con vidrio o plástico espumado. Entre los más comunes son el vidrio espumado, el poliestireno expandido y poliuretano. (Ver **Figura 3**)



Figura 3. *Aislante térmico granular: perlita a granel y miga de relleno.*

- *Aislantes térmicos celulares:* Son materiales compuestos por espacios vacíos separados entre sí. Se combinan con fibras para reforzarlos consiguiendo rigidez, estructura y forma, como lo son la vermiculita expandida, perlita expandida, silicato de calcio, etc. (Ver **Figura 4**)



Figura 4. Aislante térmico celular: Vidrio celular.

Como se ha visto, el ramo de la construcción ha buscado entrar en el área sustentable con el uso de nuevos materiales que sean amigables al ambiente, pero al mismo tiempo, pretende mantener las propiedades que ya poseen los materiales que actualmente se usan para la construcción, al lograr cumplir con estas cuestiones, se crea un beneficio para la construcción y para el medio ambiente dándole paso a la arquitectura sostenible.

El principal objetivo de la arquitectura sostenible es disminuir los impactos ambientales y asumir criterios de implementación de la eficiencia energética en su diseño y construcción, sin dejar de lado los principios de confort y salud de las personas que habitan estos edificios.^[16]

Bajo los principios de la arquitectura sostenible, se encuentran los aislantes ecológicos cuyas características son ser:

- Saludables, ya que se trata de materiales naturales no tóxicos que no contienen componentes derivados del petróleo ni sustancias o aditivos que puedan ser perjudiciales para la salud.
- Duraderos, reciclables y biodegradables y que,

- Tengan la capacidad de aislamiento térmico, es decir, tienen una conductividad térmica baja ($< 1 \text{ W/m}^*\text{K}$) ^[17].

El vidrio espuma cumple con estas características y se constituye como un nuevo aislante ecológico, en el ámbito de la arquitectura sostenible. Adicionalmente, tiene la ventaja de disminuir las emisiones de CO₂ al ambiente por el consumo de energía.

1.5. Material a base de desechos: Vidrio Espuma

El vidrio espuma, también conocido como vidrio celular, es un vidrio expandido liviano y de poros extremadamente finos con millones de ellos sellados herméticamente. Una manera de fabricación de este material es en moldes que se empaquetan con vidrio triturado o granulado mezclado con un agente químico como el carbón o piedra caliza, estos son sometidos a un tratamiento térmico para alcanzar la temperatura donde los pedazos de vidrio se reblandecen (transición vítrea) y se adhieren entre ellos atrapando el gas emitido por el agente agregado.

Los procesos patentados para la fabricación de vidrio espuma, pueden ser divididos en dos tipos: a partir del sinterizado de vidrio molido finamente con un agente espumante o, agregando fluidos directos como aire, CO₂, agua, entre otros, en el vidrio fundido.

Los primeros ejemplos del vidrio espuma fabricado a partir de sinterización son la patente de Kern L. ^[18] y el artículo de Kitaigorodski I. ^[19]. Kern mezcló sílica molida finamente con más del 20 %p de material combustible, como el carbón, lignito o madera, estos fueron utilizados con el

fin de producir O_2 o CO_2 en forma gas para generar las cavidades o porosidad necesaria en el vidrio espuma, a esta mezcla se le agregó “agentes plastificantes” (ácido clorhídrico, solución clorada, o solución de hidróxido de sodio), los cuales benefician a mantener un empaquetamiento de los polvos. Los batch fueron tratados térmicamente a una temperatura de $1500\text{ }^\circ\text{C}$, lo que resultó en vidrio de sílica altamente poroso. En el caso de Kitaigorodski, comenzó la producción industrial de vidrio espuma en 1932; la mezcla inicial era vidrio molido y carbonato de calcio ($CaCO_3$) como agente espumante, estas se calentaban arriba de los $850\text{ }^\circ\text{C}$; después de enfriarse a $600 - 700\text{ }^\circ\text{C}$, el vidrio espuma se desmoldaba en forma de bloques y se recocía. Después de un tiempo, se buscó cambiar los agentes espumantes por antracita ($> 86\%$ de carbón) y carbón. El producto final de vidrio espuma tenía una densidad de 0.3 g/cm^3 y un tamaño de poro de alrededor de 5 mm dando una conductividad térmica del rango entre los $0.06 - 0.08\text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Para el segundo tipo de fabricación del vidrio espuma, se llevó a cabo una intensa investigación, principalmente en Saint Gobain, Francia y en Pittsburgh, EUA. En el año 1934, Long ^[20] demostró la viabilidad de la fabricación de un vidrio espuma a partir de un vidrio con gases disueltos, principalmente agua, la mezcla que usaba estaba compuesta por sílica, bórax y óxido de zinc. Después de la fusión, el material era lentamente enfriado a la temperatura de transición vítrea, es decir entre los $500 - 700\text{ }^\circ\text{C}$, y se mantenía a esta temperatura hasta que los gases atrapados se liberaban, esto con el fin de dejar múltiples burbujas y así, obtener un material poroso con una densidad de 1.25 g/cm^3 . Realizaron varias modificaciones al proceso, esto con el objetivo de alcanzar la densidad que presentaba el vidrio espuma

que era fabricado por medio de sinterización, una de ella fue la inyección de gas o vapor para lograr que el volumen de burbujas creciera drásticamente. En 1940, Lytle W. ^[21], fabricó vidrio espuma en un horno de columna, en el cual introducía CO₂, vapor o aire, ya sea continuamente o intermitente, para que estos crearan burbujas en el vidrio fundido; estos gases entraban por la parte inferior del horno. Muchas más patentes fueron concedidas durante este periodo, en las que utilizaban la misma tecnología, pero con pequeños cambios, como someter el vidrio con las burbujas de gas atrapadas a una despresurización y así lograr burbujas de mayor tamaño por la expansión. Por último, la modificación que realizó Powell E. ^[22], al proceso de inyección de gases, fue reportando la formación de burbujas a partir de la descomposición térmica de agentes espumantes sólidos como el nitrato de sodio y sulfato de sodio, este era colocado en moldes con el vidrio fundido y luego, se le realizaba un tratamiento térmico a la temperatura deseada.

Este vidrio espuma es un nuevo tipo de material inorgánico para el aislamiento térmico, además cuenta con cualidades como el no ser tóxico, tener propiedades químicas estables y un buen rendimiento de aislamiento térmico que protege contra el deterioro en un amplio rango de temperaturas, desde temperaturas bajas hasta altas (-20 –400 °C). De igual manera, pueden proteger de la humedad, el fuego y la erosión. Se le ha nombrado un material de aislamiento térmico permanente sin necesidad de renovación porque no solo es seguro sino también duradero en condiciones rigurosas de temperatura baja y criogénica, bajo tierra, al aire libre, de inflamabilidad, de sensibilidad a la humedad e incluso erosión química.

El vidrio espuma es aplicado como material aislante y se ha utilizado como el sustituto del corcho, el cual es la corteza de alcornoque (árbol). Debido a su baja conductividad térmica, su baja densidad y su alta porosidad; el vidrio espuma es producido a base de minerales pulverizados que sean amorfos, agregando agentes espumantes y silicato alcalino para posteriormente, sinterizarlos a una temperatura de 950 °C. [23] Este material presenta ventajas sobre los aislantes comunes tales como las espumas orgánicas y las fibras minerales [24], pero su proceso de producción utiliza altas temperaturas de sinterizado de aproximadamente 950-1200 °C.

Con base en la disminución del uso de materias primas convencionales para su producción, así como la energía gastada en el sinterizado, en el presente estudio, se pretende utilizar vidrio de tubos de rayos catódicos de desecho [25, 26], perlita mineral fuera de especificación, cáscara de huevo y aditivos como el borato de sodio (bórax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) para producir un vidrio espuma que se utilice como aislante térmico sinterizado a bajas temperaturas, mitigando así sus desventajas de uso excesivo de minerales y sus altas temperaturas de producción.

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

2.1. Historia del vidrio espuma

La producción de vidrio espuma se remonta a los años de 1930's, cuando la mayoría de las investigaciones eran dirigidas por los países industrializados. Con tantas patentes en el mismo periodo de tiempo, es difícil conocer quién o quiénes fueron los primeros inventores del vidrio espuma. Muchos autores, mencionan que este material fue descubierto por un científico soviético pero que el material no generó cierta demanda hasta finales del siglo XX. El vidrio espuma ganó popularidad debido a que se percataron de su alto rendimiento como termoaislante y por la conciencia que se comenzó a tomar con respecto a la huella de carbono. Esto coincidió con el crecimiento de la industria del reciclaje y la necesidad de darle un uso valioso al vidrio de desecho. ^[27, 28] La 2da Guerra Mundial impulsó tanto la investigación y desarrollo como la producción del vidrio espuma en EUA, ya que este fue utilizado como termoaislante no inflamable para las paredes, pisos y techos de los barcos y submarinos. ^[19, 29] Además, se conoce que la primera planta de producción de vidrio espuma fue en los EUA, específicamente en Maryland en el año 1943. Las patentes que se tomaron

como referencia eran, principalmente, con el proceso de sinterización a partir de vidrio molido finamente con CaCO_3 y carbón, siendo estas dos últimas alternativas para agente espumante. [27] Éstos procesos patentados se pueden dividir en dos tipos: a partir del sinterizado de vidrio molido finamente con un agente espumante o agregando fluidos directos como aire, CO_2 , agua, entre otros, en el vidrio fundido.

Dado que el vidrio espuma tiene un diseño para ser un producto liviano y con alto desempeño como aislante térmico, se convirtió en el producto preferido de las personas para el diseño de casas o edificios.

2.2. Antecedentes en la Investigación del Vidrio espuma a base de residuos

Durante las últimas dos décadas, la competencia empresarial y los problemas económicos han obligado a los fabricantes de vidrio a aumentar la productividad y la calidad de sus productos. Además, las emisiones contaminantes generadas por la combustión, pueden ser un desafío igual o incluso más importante al que se enfrentan las empresas del vidrio. Por lo que las empresas productoras de vidrio han recurrido a la reutilización de este para la creación de nuevos productos como vidrio espuma, basándose en las metodologías que históricamente, se han utilizado, y así, aumentar su productividad y disminuir sus costos de operación y producción. Más no solo las empresas dedicadas al vidrio han buscado enriquecer este proceso de fabricación, sino también, algunos investigadores han buscado alternativas

para utilizar el vidrio que se encuentra en partes electrónicas o en diferentes artículos de la vida cotidiana.^[30]

En el 2005, *Bernardo E. y Albertini F.* ^[25] utilizaron como materia prima el vidrio de los tubos de rayos catódicos de desecho agregando carbonato de calcio y agua como aglomerante en un 15 %p, para la creación de vidrio espuma destinado al aislamiento térmico dando como resultado un material con conductividad térmica por debajo de los 0.070 W/m*K y una resistencia a la compresión de 1 MPa, lo que sustenta el uso de este vidrio para obtener una espuma altamente aislante.

Posteriormente, en el 2006, de nueva cuenta *Bernardo E. y col.* ^[31], usaron el residuo de vidrio sódico – cálcico, junto con residuos secos de pulido a base de carburo de silicio (SiC) y agregaron dióxido de manganeso (IV) (MnO₂), los cuales, posteriormente se presionaron en una pieza rectangular. La sinterización y la formación de espuma del vidrio se lograron sometiendo las mezclas a un tratamiento térmico a 950 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min por 1 h. El vidrio espuma resultante obtuvo una porosidad del 92% y propiedades mecánicas similares a las que presenta un vidrio espuma comercial, lo que demuestra que se elaboró con éxito un vidrio espuma amigable con el ambiente al usar residuos y no materia virgen, aportando positivamente a la línea de investigación para mejorar el proceso de fabricación del vidrio espuma.

Asimismo, *König J., Petersen R., y Yue Y.* ^[24] en el 2015, utilizaron el vidrio de los CRT con carbón activado y MnO₂ para la elaboración del vidrio espuma, encontrando que el dióxido de manganeso mejoró enormemente el efecto espumoso del carbón a la hora del sinterizado de la pieza, esto es un

beneficio ya que homogeniza la porosidad abierta del material y ayuda a disminuir el potencial de la conductividad térmica por debajo de los 0.045 W/m*K. Al tener una menor conductividad térmica, indica que el material es un mal transmisor de calor, con lo que se puede decir que el vidrio espuma obtenido, por *König J., Petersen R., y Yue Y.* fue un mejor aislante térmico.

Al año siguiente, *Guo Y. y col.* ^[32] formularon una espuma vitrocerámica a partir de residuos de porcelana pulida con un agente espumador de cenizas de carbón, además se adicionó un agente estabilizador de espuma en un 3%, el cuál fue el fosfato de sodio (Na_3PO_4). Ellos produjeron un vidrio espuma con baja densidad aparente en el rango de 0.29 – 0.37 g/cm³ y una alta resistencia a la compresión entre los valores de 1.32 – 2.88 MPa, en estos vidrios espuma se varió la cantidad de ceniza de carbón agregada a cada pieza y se encontró que el porcentaje óptimo era del 2%.

En el mismo año 2016, *Yin H. y col.* ^[33], fabricaron un vidrio espuma a partir de relaves de hierro, residuo de vidrio sódico – cálcico y SiC como agente espumante, con 24.5 %p, 74.5 %p y 1 %p, respectivamente, los cuales fueron mezclados por 12 h. Los polvos se prensaron en forma cilíndrica para pasar a ser secados a 120 °C por 24 h. Ellos utilizaron un tratamiento térmico de 810 – 860 °C por un tiempo de 30 min y después, enfriaron a temperatura ambiente. Las condiciones adecuadas que encontraron fue un vidrio espuma con mayor contenido de relaves de hierro (> 24.5 %p), a una temperatura de 830 °C que presentó una densidad de 0.224 g/cm³ y una resistencia a la flexión de 0.53 MPa.

Durante este año, *Zhu M. y col.* ^[34] también modificaron la composición del vidrio espuma agregando parcialmente residuo de cenizas volantes de

carbón. Los vidrios espuma se elaboraron con cenizas volantes de carbón y vidrio de sódico – cálcico de desecho como materiales principales, agregando bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y CaCO_3 como agente fundente y agente espumador, respectivamente. En todas las composiciones, utilizaron 30 %p de bórax y 0.5 %p de CaCO_3 , lo único que variaban fueron las materias primas principales utilizando diferentes porcentajes en peso. Las probetas fueron calentadas a 450 °C por 30 min en una mufla para remover el residuo de agua, después, estas fueron sinterizadas en un rango de temperatura de 600 – 900 °C con una rampa de 20 °C/min por 45 min y enfriadas a temperatura ambiente. Las condiciones óptimas encontradas para este tipo de residuos fueron a una temperatura de 800 °C por 45 min con una composición de 60 %p de vidrio, 40 %p de cenizas volantes, 30 %p de bórax y 0.5 %p de CaCO_3 . El vidrio espuma obtenido presentaba una densidad aparente de 0.46 g/cm³, una resistencia a la compresión mayor a 5 MPa y una conductividad térmica de 0.36 W/m*K.

Para el año 2017, Østergaard M., Petersen R., König J., y Yue Y. [35, 36] mencionaron que el uso de MnO_2 ayuda a la porosidad obteniendo un 60% con un rango de tamaño pequeño entre 0.10 – 0.16 mm, afirmando que en el vidrio espuma obtenido, el 9% v/v. es porosidad abierta lo cual es de gran ayuda para mejorar las propiedades térmicas del material, ya que se evita la convección entre poros.

En ese mismo tiempo, Souza M. y col. [37] estudiaron el uso de cáscara de huevo y vidrio de botellas para la fabricación del vidrio espuma. La cáscara de huevo se utilizó como agente espumante debido a sus altos contenidos de carbonato de calcio que son alrededor del 94 %p de su composición, lo que

ayuda a reducir los impactos en el ambiente con la reutilización de un residuo sólido urbano. Obtuvieron un vidrio espuma con una conductividad térmica de $0.055 - 0.177 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ y una porosidad parcialmente abierta (poros interconectados) entre el 83 – 92%.

Al año siguiente, 2018, *Xi C. y col.* [38] elaboraron espumas vitrocerámicas a partir de residuos de titanio y de vidrio de botella como materia prima, además, se agregaron aditivos como el carbonato de sodio (Na_2CO_3) como un agente espumador y óxido de boro (B_2O_3) como un agente fundente. Manejaron una relación 2:8 con respecto al vidrio y la escoria de alto horno de titanio, con un 2 %p de Na_2CO_3 y B_2O_3 , obteniendo una espuma vitrocerámica con una densidad aparente de 0.30 g/cm^3 , una resistencia a la compresión de 1.0 MPa, una conductividad térmica $0.060 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ y una porosidad del 88%. La temperatura óptima de sinterización que encontraron fue de $780 \text{ }^{\circ}\text{C}$, llegando a la conclusión de que con el uso de estos residuos y un agente fundente se disminuye la temperatura de sinterización, se obtuvo una espuma vitrocerámica térmicamente aislante.

En este mismo año, *Da Silva R. y col.* [39], realizaron una investigación para la fabricación de vidrio espuma con residuos de vidrio comercial (vidrio de sódico - cálcico, hidróxido de sodio (NaOH) y bórax. Las muestras se prepararon mezclando NaOH y bórax en un rango de 5 – 10 %p, para realizar las composiciones, estas fueron molidas y humedecidas en un molino excéntrico por 10 min para posteriormente, ser secadas a $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y tamizadas por malla 200. Una vez secos los polvos, realizaron el prensado de probetas a 5 MPa, para llevarlos a un tratamiento térmico de $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con una rampa de

10 °C/min por 15 y 30 min. En el que obtuvieron un vidrio espuma con una densidad variada de 0.16 – 0.79 g/cm³ y una porosidad máxima del 92%.

Por la misma época, en el año 2018, debido al gran volumen de desechos industriales que se estaban acumulando en China, *Wang H. y col.* [40] decidieron adentrarse en la sinterización de un vidrio espuma a partir de residuos sólidos como las cenizas volantes con alto contenido de alúmina y vidrio. Se mezclaron un 50 %p de vidrio, 30 %p de cenizas volantes, 15 %p arcilla y 5 %p de feldespato como materias primas. Se utilizó sulfato de calcio como agente espumante y se varió el porcentaje agregado para observar su comportamiento en el material. Las condiciones óptimas que encontraron fue una temperatura de sinterización de 1200 °C con un 2 %p de CaSO₄, resultando en un vidrio espuma con densidad aparente de 0.98 g/cm³ y una resistencia a la compresión de 9.84 MPa.

En el 2019, *Da Silva Fernandes F. A. y col.* [41], elaboraron vidrio espuma para después utilizarlo como un agregado en el concreto. Las materias primas que utilizaron fueron desecho de vidrio de sódico – cálcico en un 78 %p, ceniza de cáscara de arroz agregado en un 16 %p y carbonato de calcio con un porcentaje 6 %p, un 5 %p de agua y alcohol polivinílico. Formaron discos con los polvos y estos fueron sinterizados a 850 °C con una rampa de 10 °C/min por 30 minutos para posteriormente, dejarlos enfriar lentamente. El vidrio espuma obtenido tenía una porosidad en el rango de 87 – 93% y, además, una resistencia a la compresión de 0.51 MPa, cumpliendo con los requerimientos básicos de un vidrio espuma comercial.

En el mismo año, *Chen Z. y col.* [42], estudiaron la viabilidad de usar los residuos de lana mineral con residuo de vidrio de una instalación municipal de

reciclaje, para la elaboración de vidrio espuma. Los vidrios espuma que resultaron óptimos, fueron elaborados a partir del uso de residuo de vidrio en un 50 %p con residuo de lana mineral en un 40 %p agregando un 2 %p de carburo de silicio (SiC) como agente espumante. Éstos tuvieron una temperatura de sinterización de 1170 °C, una densidad de 0.71 g/cm³ y una distribución de poro uniforme. Concluyeron que las propiedades obtenidas en los materiales que desarrollaron eran favorables para competir con productos comerciales y demostraron que el uso de los residuos utilizados podían ser una alternativa para la elaboración de materiales más amigables con el ambiente.

Igualando la línea del 2019, *Ji R. y col.* ^[43], reportaron un método de fabricación para el vidrio espuma a bajas temperaturas, a base de vidrio reciclado de construcción y lana mineral con aditivos como el borato de sodio o también conocido como bórax, carbonato de calcio (CaCO₃) y fosfato de sodio (Na₃PO₄), lograron obtener una temperatura óptima de sinterización a 800 °C con concentraciones bajas de alrededor del 40 %p de lana mineral. También, encontraron que el bórax en concentraciones superiores al 20 %p, disminuía la temperatura de sinterizado y la densidad del material elaborado. El vidrio espuma obtenido presentó una densidad de 0.7 g/cm³, este valor fue utilizado en la simulación que realizaron para conocer la reducción de energía en los edificios la cual fue alrededor del 32%, sustentando que cumplió con su objetivo de aislante térmico.

Como se puede observar, a lo largo de las últimas dos décadas, el vidrio espuma ha tenido muchas actualizaciones en su proceso de fabricación, dando como resultado un material que va en mejora constante. Además,

actualmente, el vidrio espuma puede ser fabricado con una gran variedad de residuos, logrando así que su proceso sea amigable con el ambiente, con menor costo de producción y aportando positivamente al ambiente, al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales constituyen un tema muy importante que tomar en cuenta a la hora de buscar mejorar y dar un beneficio extra a los materiales termoaislantes, así como también, aumentan las posibilidades de este material para ser aplicado y preferido sobre otros termoaislantes, en un futuro cercano.

2.3. Antecedentes en la Investigación de la Perlita Mineral como materia prima para materiales aislantes

La perlita mineral contiene distintos beneficios para su uso como materia prima en la fabricación de materiales para la construcción. La perlita es un vidrio volcánico hidratado que tiene agua en su estructura cristalina, está compuesta de un alto contenido de SiO_2 y posee una temperatura de reblandecimiento de 870 – 1093 °C. Aprovechando estas propiedades, se puede decir que es viable que sea utilizada en la industria de la construcción, como es el caso de la perlita expandida que se utiliza en yesos ligeros, aislantes y en productos cerámicos para rellenar huecos y mejorar así las propiedades energéticas de los materiales de construcción.^{[44][45]}

En el 2006, *Topçu I. B. y col.* ^[46], fabricaron un ladrillo resistente a altas temperaturas añadiendo perlita a la arcilla convencional. Como resultado, obtuvieron que, si aumentaban el porcentaje de perlita agregada, se reducía la resistencia a la compresión, sin embargo, la conductividad térmica y la

contracción aumentaban. El porcentaje que favoreció a la mayoría de las propiedades fue de 30% de perlita, con una conductividad térmica de 0.185 kcal/m h °C, la cual es menor a la de un ladrillo convencional que tiene un valor de 0.40 kcal/m*h*°C (0.22 W/m*K), por lo tanto, concluyeron que al agregar la perlita sirvió para disminuir su conductividad y cumplir con el objetivo del estudio.

En el año 2010, *Sengul O. y col.* ^[47], estudiaron los efectos de la perlita expandida en las propiedades mecánicas y la conductividad térmica en el concreto ligero. Las mezclas que realizaron fueron reemplazando el agregado natural por perlita expandida, obteniendo concreto ligero con una densidad aparente de 700 – 2000 kg/m³. Además, encontraron que la conductividad térmica de este concreto se reducía con el aumento de perlita, excepto para el caso de las propiedades mecánicas, ya que afectaba al aumentar su porcentaje por lo que tomaron como concreto aislante a aquellos que contenían un porcentaje mayor al 20% de perlita.

En el mismo año, *Vaou V. y Panias D.* ^[48], fabricaron geopolímeros espuma a base de perlita mineral, que comprenden una nueva familia de materiales espumosos inorgánicos de aislamiento térmico. Esta metodología se basó en transformar los distintos silicatos sólidos amorfos y los aluminosilicatos en productos con valor agregado. Las materias primas usadas fueron perlita, hidróxido de sodio (NaOH) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Los geopolímeros espuma de perlita no expandida demostraron ser muy buenos materiales de aislamiento térmico, en comparación con los termoaislantes orgánicos e inorgánicos comerciales, ya que estos tienen una

conductividad térmica casi similar de un valor de $0.03 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ y poseen una resistencia a la compresión superior de 780 kPa .

En el 2013, *Celik A. G. y col.* ^[9] estudiaron a la perlita expandida para ser usada como materia prima en materiales para la construcción, se basaron en la determinación de distintas propiedades de la perlita con el aumento de temperatura. La perlita se sometió a un tratamiento térmico a $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, para ser expandida hasta un tamaño de entre $0.2 - 2 \text{ mm}$ y una densidad de $150 - 300 \text{ kg/m}^3$. El área superficial más alta se obtuvo a $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ con un valor de $523.8 \text{ m}^2/\text{g}$; además, encontraron que la densidad aparente, la porosidad y la razón de compactación disminuían dependiendo de la temperatura. También, obtuvieron que la perlita expandida tenía una estructura porosa y vítrea, y presentaba un porcentaje de 1.8% de pérdida de peso a $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que significa que esta puede ser utilizada en aplicaciones de alta temperatura.

En el año 2019, *Gao H. y col.* ^[49], diseñaron un nuevo material inorgánico termoaislante con poros combinando un método a temperatura ambiente y un tratamiento térmico en mufla. Utilizaron como materia prima el residuo de perlita, vidrio, bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) y una solución del 30% de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), donde el método a temperatura ambiente era mezclar esta materia prima sin la solución de H_2O_2 en un mezclador eléctrico, después se agregaba la solución para que el lodo fuera colocado en un molde de sílica gel y se mantenía a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h . Una vez secado el lodo a $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h , les realizaron un tratamiento térmico a distintas temperaturas, obteniendo un material con una densidad aparente de 0.148 g/cm^3 , una resistencia a la compresión de 0.30 MPa y una conductividad térmica de $0.047 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$; resultando ser mejor este nuevo tipo de material

inorgánico termoaislante, ya que se reduce hasta un 10% su conductividad térmica, comparada con los materiales orgánicos termoaislantes.

Para el año 2020, *Hamza A. y col.* ^[44], investigaron la viabilidad de mejorar el aislamiento térmico de los ladrillos de arcilla. Utilizaron dos tipos de aditivos, aserrín y perlita, donde variaron los porcentajes en peso de cada uno que se agregaron a la arcilla entre 3.35 – 6.5 %p para preparar las muestras, estas se prepararon por medio de una extrusora de vacío y se sometieron a un tratamiento térmico de 880 °C. Los resultados que obtuvieron fueron que, para los ladrillos con 3.35 %p de aserrín y 6.5 %p de perlita, la densidad aparente disminuyó en un 15% comparada con la de referencia, que era de 1.85 g/cm³ (sin aditivos), además, obtuvieron una resistencia de compresión de 20 MPa y una conductividad térmica 0.14 W/m*K.

En este mismo año, *Davraz M. y col.* ^[50], estudiaron la producción de un material aislante térmico ligero-monolítico (monoper) utilizando roca (RPC) y polvo fino de perlita (RPF). La función de la perlita fue como material de relleno y se le agregó hidróxido de sodio a la mezcla como agente fundente, así como un agente espumante, estos fueron mezclados en distintas proporciones y prensados en moldes cilíndricos para ser secados a 105 °C hasta que se obtuviera un peso seco constante. Las muestras secas fueron colocadas en un horno de cenizas a 850 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min por 10 min., para después ser enfriadas a temperatura ambiente. Ellos encontraron que los porcentajes en peso óptimos de RPC, RPF, solución de hidróxido de sodio y agente espumante fueron de 36.5%, 36.5%, 25% y 2%, respectivamente. La densidad aparente obtenida fue de 95 kg/m³, una resistencia a la compresión de 270 kPa y una conductividad térmica de 0.0396

W/m*K, lo que confirma que este tipo de material puede ser utilizado en aplicaciones de aislamiento térmico en cualquier edificación.

2.4. Análisis Crítico de Literatura

Existen estudios que utilizan distintos residuos de vidrio, como lo son vidrio de sódico - cálcico, VCRT, vidrio de construcción, entre otros, para la fabricación de vidrio espuma [24, 25, 31, 33, 34, 37, 39, 40, 42, 43]. A lo largo de todos estos estudios, se ha logrado mejorar el proceso de fabricación de vidrio espuma, así como las propiedades de cada uno de ellos, además, se ha encontrado una gran variedad de residuos o desechos que han logrado ser utilizados como materia prima para elaborarlo, lo que beneficia al medio ambiente con un menor costo de producción y, sobre todo, más en estos tiempos donde cualquier industria busca eliminar o disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Para el caso de la perlita mineral, esta ha sido utilizada como materia prima para elaborar ladrillos aislantes [44, 46], perlita expandida [9, 47], geopolímeros térmicamente aislantes [48] y materiales aislantes en sí [49, 50]. Estos estudios han demostrado que la perlita mineral puede beneficiar en gran medida para obtener un material térmicamente aislante y que resista altas temperaturas.

Sin embargo, muchos de estos estudios a base residuos/desechos, no han logrado obtener un material que presente estas dos propiedades juntas, es decir, una alta resistencia mecánica y una baja conductividad térmica, además de que no se ha probado el uso de vidrio y perlita mineral para la fabricación de vidrio espuma.



En este trabajo, se estudió la posibilidad de producir un vidrio espuma con una alta resistencia mecánica y una baja conductividad térmica partiendo de vidrio de tubos de rayos catódicos y agregando la perlita mineral para aportar al aislamiento térmico, para ello, se realizaron distintos lotes con un porcentaje diferente entre estos dos y se probó sinterizarlos a 5 temperaturas distintas, con la finalidad de obtener las condiciones óptimas para la fabricación de un vidrio espuma. También, se determinaron sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas a los VES obtenidos para su posible aplicación como material aislante en el ramo de la construcción.

CAPÍTULO 3

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVO DEL PROYECTO

3.1. Hipótesis

El empleo de vidrio de desecho de CRT y perlita mineral permite la generación de vidrio espuma de baja conductividad térmica para aplicaciones de aislamiento térmico.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo General

Obtener vidrio espuma a partir de vidrio de desecho de CRT, perlita mineral fuera de especificación y cáscara de huevo como aislante térmico.

3.2.2. Objetivos Específicos

- Definir las variables de diseño que influyen en la fabricación de vidrio espuma con base en un diseño de experimentos.



- Sustituir materias primas del proceso de producción del vidrio espuma por residuos/desechos y disminuir la temperatura de fabricación con el fin reducir el impacto ambiental y el exceso de consumo energético.
- Producir un material altamente poroso con el fin de conseguir una baja conductividad térmica y este pueda ser comparada con el vidrio espuma comercial.
- Caracterizar el vidrio espuma obtenido a partir de los siguientes métodos:
 - Difracción de Rayos X (DRX)
 - Fluorescencia de Rayos X (FRX)
 - Análisis Térmico Diferencial (DTA/TG)
 - Análisis de Conductividad Térmica (CT)
 - Resistencia a la Compresión (RC)

3.3. Aportación Científica

Determinación de la influencia de la microestructura en la densidad aparente, la conductividad térmica y la resistencia a la compresión del vidrio espuma obtenido, a partir de material de desecho y perlita mineral para su aplicación como aislante térmico en el ramo de la construcción.

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA

4.1. Recolección y Preparación de la muestra

El vidrio de CRT (VCRT) se obtuvo de un aparato electrónico, el cual era una televisión marca PHILIPS modelo 29PT6441/85 (**Figura 5**), esta fue donada al Laboratorio de Pruebas e Investigación en Cerámica para ser utilizada en los proyectos próximos. La televisión fue desmantelada, quitando todos los cables hasta obtener el marco con la pantalla. La pantalla fue fracturada con un martillo para obtener porciones de tamaño pequeño y fuera más sencillo realizar la molienda en el material.



Figura 5. Televisión marca PHILIPS usada para obtener el VCRT.

La perlita mineral (PM) fue donada por la empresa TERMOLITA® del municipio de Santa Catarina. Dicha empresa hace un análisis a la perlita que extraen con el fin de obtener cierto porcentaje de óxido de hierro (Fe_2O_3); al excederse de este porcentaje “válido”, la empresa toma la decisión de descartar aquella perlita que contenga un valor mayor al deseado por lo que la catalogan como “fuera de especificación”, y no es utilizado en su proceso. Se realizó un proceso de homogenización por el método de cuarteo en una cantidad aproximada de 5 kg de material. Este método se basa en colocar el material en forma de cono (“montaña”) para luego aplanarlo, esto con el fin de partir en cuatro partes iguales y descartar dos de ellas hasta obtener una muestra de menor tamaño y que sea representativa del lote.

La cáscara de huevo (ES) se recolectó de 3 diferentes casas habitación. Esta fue lavada con agua y jabón de lavaplatos, eliminando cualquier residuo orgánico o mancha ocasionada por su contacto con los residuos, esto con el fin de evitar cualquier contaminación y no tener componentes no deseados en la preparación de las composiciones.

El vidrio de CRT y la cáscara de huevo fueron sometidos a un proceso de molienda en un molino vibratorio (**Figura 6a**), RockLabs, Bench mill, donde se mantenían por lapsos de 1 min para obtener un polvo fino. Para la perlita mineral, se utilizó un molino de bolas (**Figura 6b**), WISD, Ball Mill L2 con el fin de disminuir la aglomeración de materia y se manejara sencillamente, esta se mantenía en molienda durante 4 horas para obtener un polvo fino. Una vez obtenidos los polvos, se procedió a tamizarlos en una malla 200, para obtener un tamaño de partícula que fuera igual o menor a $74 \mu\text{m}$.

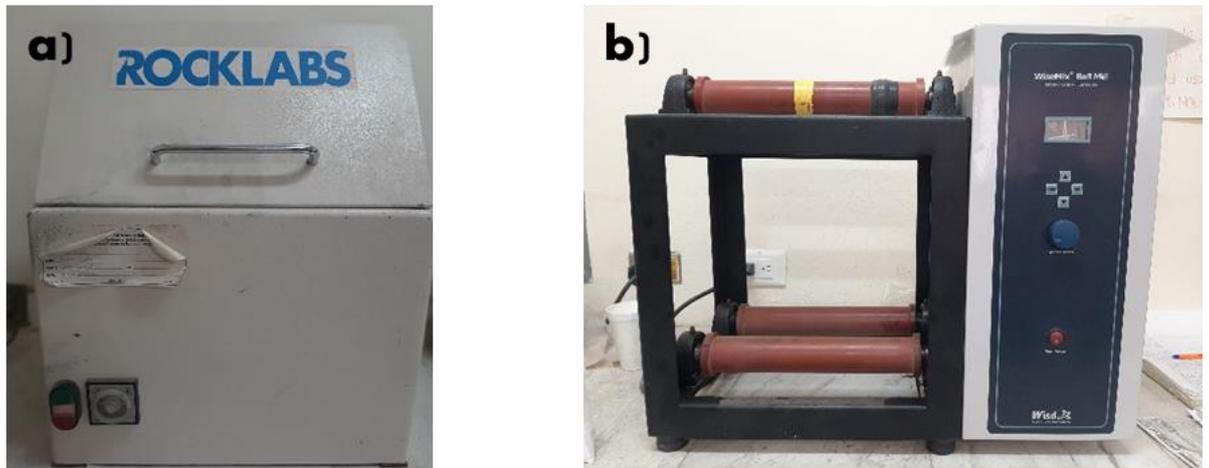


Figura 6. Molinos utilizados para la preparación de materia prima; a) Molino vibratorio RockLabs, b) Molino de bolas Wisd.

4.2. Caracterización de las materias primas

4.2.1. Análisis Cristalográfico por Difracción de Rayos-X, DRX.

La estructura cristalina es un conjunto de átomos en orden periódico, este es encontrado en muchos sólidos naturales y artificiales. Es por lo que al incidir un haz de rayos-X sobre un sólido cristalino, se da la difracción de rayos-X. Ocasiona que se forme un ángulo entre el haz y la superficie del sólido, al cual se le conoce como ángulo de difracción (θ). Este ángulo es dependiente del arreglo atómico y la longitud de onda (λ) del haz, este comportamiento es explicado por la ecuación de Bragg:

$$n * \lambda = 2d * \text{sen } \theta \quad [1]$$

Esta ley establece la condición esencial que debe cumplirse para que ocurra la difracción; dentro de la ley de Bragg, n se denomina orden de difracción y debe ser un número entero consistente con el seno de theta, menor o igual que 1. Como cada familia de planos tiene una distancia interplanar d, al detectar estos planos a diferentes ángulos, los resultados

serán diferentes según la estructura que se esté midiendo, por lo que se pueden caracterizar las fases que componen la muestra con base en los diferentes “picos” de detección que son en realidad las reflexiones de los planos de cada fase.^[51] Sobre esta estructura tridimensional, se pueden obtener distintos planos cristalográficos paralelos, los cuales pasan por tres puntos cristalográficos distintos en la celda unitaria.

Las muestras de los residuos a usar fueron analizadas por medio de DRX para determinar las fases cristalinas presentes. Se utilizó un difractómetro marca Bruker AXS modelo D2 Phaser, el equipo trabajó utilizando una radiación de $\text{CuK}\alpha$ con una longitud de onda de 1.5418 \AA (Ver **Figura 7**). Las muestras se sometieron a una corrida de 2θ de 5° a 90° . Cada uno de los difractogramas obtenidos fueron comparados con la base de datos *Diffracplus EVA* con la finalidad de identificar las fases presentes para cada residuo.

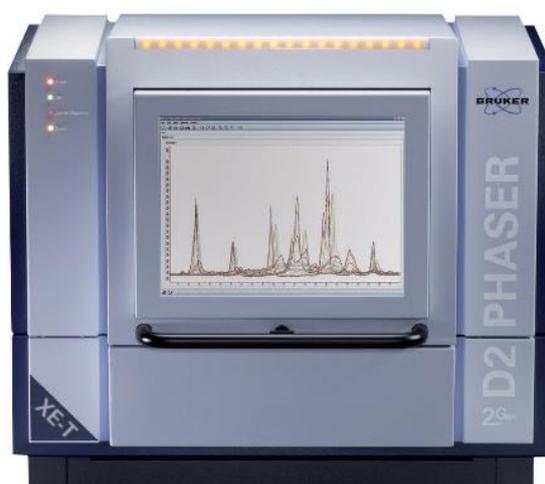


Figura 7. Difractómetro, Bruker AXS, D2 Phaser.

4.2.2. Análisis Elemental por Fluorescencia de Rayos-X, FRX.

Las materias primas fueron analizadas por FRX para identificar los elementos u óxidos presentes en estas.

Esta técnica se basa en la emisión secundaria o fluorescente de rayos-X generada por la excitación, a partir de una fuente de radiación, de una muestra. Esta fuente incidente o primaria, expulsa electrones de capas interiores del átomo para que las vacantes sean ocupadas por los electrones de capas más externas, por lo que el exceso energético de esta transición se disipa con cierta longitud de onda característica y una intensidad que se relacionan directamente con la concentración o porcentaje presente del compuesto en la muestra a analizar. [52]

El análisis de FRX, se realizó en el Centro de Investigación en Biotecnología y Nanotecnología (CIBYN) de la UANL.

4.2.3. Análisis Térmico Diferencial y Termogravimétrico, DTA/TGA.

El análisis de DTA se basa en la diferencia de temperatura entre la muestra y una de referencia, estas son calentadas al mismo tiempo y con el mismo programa. El DTA se realiza con un bloque con cavidades simétricas para la muestra y la referencia es calentada en un horno. El bloque se elige para que actúe como un disipador de calor, además, se incluye un portamuestras de baja conductividad térmica entre el bloque y la muestra para garantizar una señal de temperatura diferencial adecuada durante el análisis. [53]

Al suceder un evento térmico endotérmico, se presentará una curva superior en la gráfica, es decir, se dará un ΔH positivo que puede presentarse

cuando la muestra está fundiendo. Para el caso de un evento exotérmico, se presentará una curva inferior y será un ΔH negativo, el cual se puede dar cuando la muestra analizada está teniendo un proceso de oxidación. [53]

Para el caso de la técnica de Termogravimetría, (TG, de manera análoga a otras técnicas de análisis térmico) es un análisis en el que una muestra se somete a un programa de temperatura controlado con una atmósfera específica y una vez cumplido el programa se cuantifica el peso de la muestra perdido con respecto al tiempo o temperatura. La característica principal de TG, es que sólo permite detectar procesos en los que se genera una diferenciación de peso, como lo son las descomposiciones, sublimaciones, reducción, desorción, absorción, entre otros. [53]

El equipo utilizado para los análisis térmicos de las materias primas fue prestado por la Facultad de Ingeniería y Mecánica (FIME). Las condiciones de calentamiento fueron bajo una atmósfera de aire y se sometieron 27 mg de muestra a un rango de calentamiento de 25 a 1200 °C, a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

4.3. Preparación del material

Las composiciones se elaboraron agregando vidrio de CRT y perlita mineral en diferentes porcentajes en peso como se marca en la **Tabla 1**. Los aditivos que se agregaron fueron la cáscara de huevo que se utilizó como agente espumante y el bórax como agente fundente para disminuir la temperatura de fundición. Para los siguientes aditivos como el agente estabilizador de espuma (AEE) y el agente aglomerante (AA), se tenían 2

diferentes para realizar el análisis, en el caso del AEE, se agregó fosfato de sodio (Na_3PO_4) o dióxido de manganeso (IV) (MnO_2) y para el AA, se tenía agua destilada o alcohol polivinílico (PVA).

Tabla 1. Composiciones de cada batch

Muestras	Vidrio de CRT de desecho (%p)	Perlita Mineral (%p)	Cáscara de huevo (%p)	Bórax (%p)	AEE (%p)	Aglomerante (mL)
A	100	0	1	20	2	5
B	80	20	1	20	2	5
C	60	40	1	20	2	5
D	40	60	1	20	2	5
E	20	80	1	20	2	5

%p [=] Porcentaje en peso; AEE [=] Agente estabilizador de espuma. NOTA: Las composiciones están a un 100% en los principales componentes (vidrio de CRT y perlita mineral), los demás componentes se usaron como aditivos.

Luego de elaborar las muestras con su debida composición, se procedió a agregar el aglomerante en una cantidad de 5 mL, para luego, realizar el prensado de los polvos en una prensa hidráulica (**Figura 8**, Carver, 4350-L) a 6500 psi en tamaño de cubos de 30 x 30 x 15 mm (**Figura 9**). Obtenidas las piezas, estas fueron secadas a 150 °C por 24 h en un horno de convección (**Figura 10**, Thermo Scientific Heratherm, OGS-180). Cada batch, se realizó por triplicado para obtener un estadístico adecuado.



Figura 8. Prensa Hidráulica, Carver 4350-L.



Figura 9. Molde metálico usado para el prensado de polvos.



Figura 10. Horno de convección, Thermo Scientific HeraTherm, OGS-180.

4.4. Disposición de residuos

La disposición de los residuos generados durante el proyecto fueron manejados bajo la normativa de la Facultad de Ciencias Químicas UANL quedando como responsables de la correcta disposición temporal y final.

Los residuos sólidos que fueron desechados a lo largo del proyecto fueron depositados en el contenedor B (sólidos y sales inorgánicas).

4.5. Sinterización del Vidrio espuma

Una vez cumplidas las 24 h del secado, se procedió con el sinterizado de las muestras. Primeramente, se colocaron en un horno mufla (**Figura 11**, Carbolite, CWF-1300) y se llevaron hasta una temperatura de 500 °C con una razón de calentamiento de 10 °C/min y se mantuvieron a esta temperatura por 20 minutos. A continuación, se elevaron hasta una temperatura dentro del

rango de 600-800 °C según correspondía, con una rampa de 20 °C/min por 20 min y una vez cumplido el tiempo, se dejaron enfriar dentro de la mufla hasta temperatura ambiente.



Figura 11. Mufla Carbolite, CWF-1300.

La elaboración y sinterización de cada muestra fue guiada por un diseño experimental de bloques, presentado en la **Tabla 2**, donde sus variables eran la temperatura de sinterizado y la composición entre VCRT y PM. Este se hizo por triplicado para obtener un estadístico de cada vidrio espuma sinterizado.

Tabla 2. *Diseño de experimentos de bloques.*

Temperatura	Composiciones				
800 °C	A1	B1	C1	D1	E1
750 °C	A1	B1	C1	D1	E1
700 °C	A1	B1	C1	D1	E1
650 °C	A1	B1	C1	D1	E1
600 °C	A1	B1	C1	D1	E1

A1 [=] Composición A (100 %p VCRT y 0 % PM) la repetición 1; B1 [=] Composición B (80 %p VCRT y 20 %p PM) repetición 1; C1 [=] Composición C (60 %p VCRT y 40 % PM) la repetición 1; D1 [=] Composición D (40 %p VCRT y 60 %p PM) repetición 1; E1 [=] Composición E (20 %p VCRT y 80 % PM) la repetición 1.

4.6. Caracterización del Vidrio espuma sinterizado

4.6.1. Análisis Cristalográfico, DRX.

El vidrio espuma sinterizado (VES) se pulverizó hasta obtener un polvo fino para realizarle el análisis de DRX, con la finalidad de observar las fases cristalinas que se tengan en el material, además, de verificar si se formaron nuevas fases debido al tratamiento térmico al que se sometieron.

Para este análisis, se decidió seleccionar las que presentaran una densidad aparente en el rango de 0.5 – 0.7 g/cm³ y un porcentaje de porosidad entre 30 – 50 %.

4.6.2. Absorción de agua, ASTM C373.

Después del tratamiento térmico, el VES se colocó en el horno de convección, mostrado en la **Figura 10**, a una temperatura de 150 °C por 24 h. Cumplido el tiempo, se acomodaron en un desecador y se procedió a dejar

enfriar hasta temperatura ambiente, esto con la finalidad de que el VES presentara una masa constante, es decir, el peso seco.

Una vez colectado el peso seco, se procedió a colocar las piezas en un equipo ISOVACUUM, Gabbriellui, GT-1907 (**Figura 12**), para realizar la prueba de absorción de agua, esta se basa en la metodología presentada por la norma ASTM C373 - 14. ^[54] Esta consistió en disminuir la atmósfera de la cámara hasta vacío para extraer el aire o agua que aún estuviera retenida en el VES, se mantuvo a esta condición por 30 min, para luego aumentar el nivel de agua hasta sumergir el VES completamente.



Figura 12. Equipo ISO-VACUUM, Gabriellui, GT-1907.

Al término de la prueba, el VES se mantuvo sumergido en agua para medir el peso suspendido. Algunas de los VES emergieron en el agua, debido a su alto porcentaje de porosidad, por lo que, para registrar su peso suspendido se realizó lo siguiente; en la balanza analítica, AND HR-120 (**Figura 13**) se colocó una pesa de 50 g en el plato superior y en la parte inferior, se enganchó una canastilla de malla para mantener la pieza dentro de ella y esta realizara un empuje hacia arriba y marcara un peso, el cual se le restaba a la pesa de 50 g y ese se registró como el peso suspendido. Para

los VES que no emergieron, solo se colocó la canastilla de malla y se colocaba la pieza dentro de ella.



Figura 13. Balanza analítica, AND, HR-120.

Una vez registrado el peso suspendido de cada VES, se procedió a recolectar el peso saturado, este se tomaba, después de secar el VES con una microfibrá saturada con agua destilada, la saturación de la microfibrá se tomó de acuerdo con el doble de su peso seco, es decir, si la microfibrá pesaba 50 g, se le añadían 100 g de agua. Al secar la pieza, se colocó en una balanza Ohaus Pioneer, PA 3102C (**Figura 14**) y se registró su peso saturado.



Figura 14. Balanza digital, Ohaus Pioneer, PA 3102C.

La densidad real es el cociente entre la masa del material entre el volumen real, excluyendo las cavidades o poros presentes. En cambio, la densidad aparente es el cociente entre la masa del material entre el volumen aparente de este, es decir, el volumen abarca tanto el volumen de las partículas como el volumen de un poro interno.

Basados en la norma ASTM C373, se procedió a realizar los cálculos debidos para la obtención de la densidad y porosidad aparente con las siguientes ecuaciones: (asumiendo que 1 g de agua es igual a 1 cm³).

$$B = \frac{D}{(M - S)} \quad [2]$$

$$P = \left[\frac{(M - D)}{(M - S)} \right] \times 100 \quad [3]$$

Donde:

D= Peso seco (g)

M= Peso saturado (g)

S= Peso suspendido (g)

B= Densidad aparente (g/cm³)

P= Porosidad aparente (%)

4.6.3. Análisis de distribución y tamaño de poro.

Para analizar el tamaño y distribución de poro de cada VES, se tomaron fotografías con una cámara de 25 MP, resolución de 4032x2268 y un ISO 64. Estas imágenes se sometieron a un análisis en el software ImageJ®.

La imagen fue editada a escala de grises para luego, someterla a distintos ajustes en ImageJ®. Primero se estableció la escala a trabajar, la cual dependía de los píxeles de cada imagen, una vez realizado esto, se procedió a recortar un rectángulo de la imagen donde se pudiera observar el VES y su porosidad, en este caso se tomó el área que abarcara mayor espacio en la pieza, en general fue de 3.5 cm de largo por 2.0 cm de ancho. Esta sección rectangular se duplicó y se le ajustó el contraste y el brillo en 50 y 40, respectivamente. Después, se le colocó un filtro del software, llamado FFT, el cual filtra las estructuras grandes (corrección del sombreado) y las pequeñas (suavizado) del tamaño especificado, mediante un filtro gaussiano en el espacio de Fourier. Una vez editada y ajustada la imagen del VES, se procedió a realizar un análisis de la porosidad. Este análisis midió el diámetro, área y perímetro de cada poro.

Además, se realizó un análisis de Distribución Normal por medio del software Origin Pro®, que produjo histogramas para analizar los datos experimentales obtenidos para la porosidad presente.

4.6.4. Análisis de Conductividad Térmica.

Los análisis de Conductividad Térmica se realizaron en el Centro de Materiales Avanzados (CIMAV) Unidad Chihuahua, en un equipo marca Anter Unitherm modelo 2022. Este equipo basa su técnica de análisis, en la norma ASTM E 1530 - Evaluación de la resistencia a la transmisión térmica de Materiales mediante la técnica del medidor de flujo de calor (sistema aislado) (**Figura 15**) ^[55]. El equipo se basa en una muestra y un transductor de flujo (HFT) que se encuentran entre dos placas planas controladas a diferentes temperaturas, esto con el fin de producir un flujo de calor a través de las

muestras, a esto se le agrega una carga determinada en MPa para garantizar que exista un contacto entre la muestra y las placas. Además, las muestras se encuentran rodeadas por un protector para mantener la temperatura media uniforme de las placas y así disminuir el flujo de calor lateral que pueda llegar a estas. Una vez en estado estacionario, se mide la diferencia de temperaturas con termopares incrustados en la superficie, junto con la salida eléctrica del HFT. Esta salida (voltaje) es proporcional al flujo de calor que atraviesa a la muestra, esta proporcionalidad se obtiene mediante la calibración previa del equipo con muestras de resistencia o conductividad térmicas conocidas (medidas a las mismas condiciones).

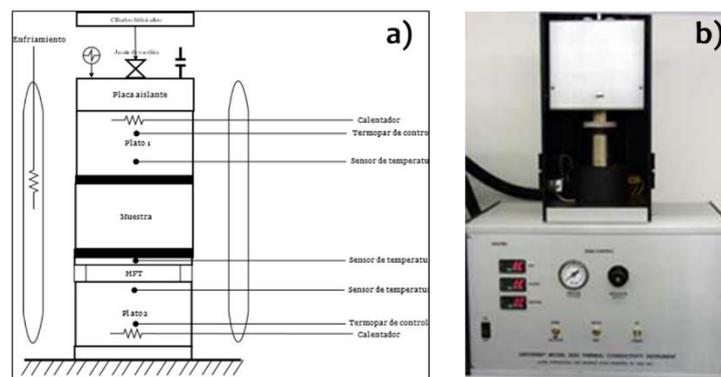


Figura 15. Equipo de conductividad térmica: a) Esquema del equipo (referencia ASTM E1530), b) Anter Unitherm modelo 2022.

La calibración del equipo se realizó con tres materiales; un material aislante, un semiconductor y un conductor, los cuales fueron vespel (poliimida, estándar verificado) que resultó con una conductividad térmica de 0.3 – 0.4 W/m*K, una pieza de vidrio Pyrex con un valor de 1 W/m*K y, por último, un cuadrado de acero inoxidable de 14 W/m*K.

El análisis abarca una técnica de estado estacionario donde se determina la resistencia a la transmisión térmica (resistencia térmica) de materiales con espesores menores a 25 mm. Este análisis es útil para las probetas que tienen una resistencia térmica en el rango de 10 a $400 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$, que puede obtenerse a partir de materiales con una conductividad térmica en el rango de 0.1 a $30 \text{ W/m}^*\text{K}$, de igual manera, la técnica puede utilizarse fuera de estos rangos con una precisión reducida, esto para especímenes más gruesos y con valores de conductividad térmica de hasta $60 \text{ W/m}^*\text{K}$.

Las muestras fueron recortadas y lijadas, obteniendo como resultados las siguientes dimensiones enlistadas en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Dimensiones de los VES para el Análisis de Conductividad Térmica.

Composición	cm	Repetición		
		1	2	3
A (100 %p VCRT – 0 %p PM)	<i>b</i>	5.06	5.1	4.6
	<i>h</i>	2.61	2.6	2.5
	<i>a</i>	2.45	2.3	2.3
B (80 %p VCRT – 20 %p PM)	<i>b</i>	4.45	4.6	4.06
	<i>h</i>	2.34	2.33	2.3
	<i>a</i>	2.28	2.34	2.35
C (60 %p VCRT – 40 %p PM)	<i>b</i>	4.25	4.24	4.3
	<i>h</i>	2.34	2.26	2.33
	<i>a</i>	2.22	2.32	2.4

b [=] Base, cm; *h* [=] Altura, cm; *a* [=] Espesor del VES, cm.

El procedimiento que se llevó a cabo para la medición de una muestra es como se indica a continuación. Se calibró el equipo con los materiales previamente mencionados donde se midió el espesor de estos. Una vez realizadas las mediciones, se recubrieron ambas superficies de la muestra de calibración con una capa muy fina de pasta térmica para minimizar la

resistencia térmica en las superficies adyacentes y aumentar el contacto. Posteriormente, se liberó la carga de compresión en las celdas de muestras y se abrió la cámara de ensayo donde se coloca la muestra de calibración; se debe tener mucho cuidado, ya que todas las superficies deben estar libres de cualquier material o polvo. Al colocar la muestra entre las placas, se sujetó y se cerró la cámara de ensayo para aplicarle una carga. Luego, se esperó a que se alcanzara el equilibrio térmico (cuando las T's no se desvíen más de 0.1 °C en 1 min) y se registraron las temperaturas. Después de realizar la calibración, se procedió a retirar el material de calibración y se realizó el mismo procedimiento, pero con la muestra a analizar. Una vez, registradas las temperaturas para cada muestra a analizar, se utilizaron las siguientes ecuaciones para el cálculo de la conductividad térmica.

$$R_s = \frac{N(T_1 - T_2)}{Q} - R_o \quad [4]$$

Donde:

R_s = Resistencia térmica de la muestra, $m^2 \cdot K/W$

N = Constante de calibración del transductor de flujo térmico, $W/m^2 \cdot mV$

T_1/T_2 = Temperaturas de las superficies de la muestra, °C

Q = Flujo de calor, W

R_o =Parámetro de contacto (obtenido de la calibración)

Al obtener la resistencia térmica, se procede a calcular la conductividad térmica con la siguiente ecuación.

$$k = \frac{\Delta x}{R_s} \quad [5]$$

Donde:

k= Conductividad térmica de la muestra, W/m*K

Δx = Espesor de la muestra, m

4.6.5. Análisis mecánico, Resistencia a la compresión, RC.

Para el método de prueba realizado, se hizo tomando en cuenta lo marcado por la norma ASTM C133 ^[56], la cual marca los estándares para obtener la medición de esta propiedad en materiales refractarios. La preparación de la muestra consiste en que el VES no tenga grietas, superficies afiladas o cualquier otro defecto, además, las superficies donde se aplicó la carga fueron paralelas y planas, esto se cumplió cortando los VES con una cortadora de baja velocidad Struers, Minitom, (**Figura 16**) La velocidad de carga usada fue de 1.3 mm/min como lo marca la norma y el equipo utilizado fue una máquina de ensayos universal INSTRON 5985 (**Figura 17**). Los VES se colocaron en el centro del yunque de carga.



Figura 16. Cortadora de baja velocidad Struers, Minitom.

Para la medición de resistencia a la compresión, se usó la carga máxima total que marca la máquina de pruebas (W) a la cual el VES fue fracturado abruptamente y se dividió entre el área transversal del material (A), como se muestra en la ecuación marcada en la norma ASTM C133:

$$S = \frac{W}{A} \quad [6]$$

Donde:

S = Resistencia a la compresión, lb_f/in^2 (MPa)

W = Carga máxima total, lb_f (N)

A = Área transversal, in^2 (mm^2)



Figura 17. Máquina de ensayos universal INSTRON 5985.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización de materia prima

5.1.1. Análisis Cristalográfico, DRX.

Para la materia prima, se realizó un análisis de DRX, en donde se obtuvieron los difractogramas para cada uno de los componentes principales, como lo son el VCRT, PM y ES.

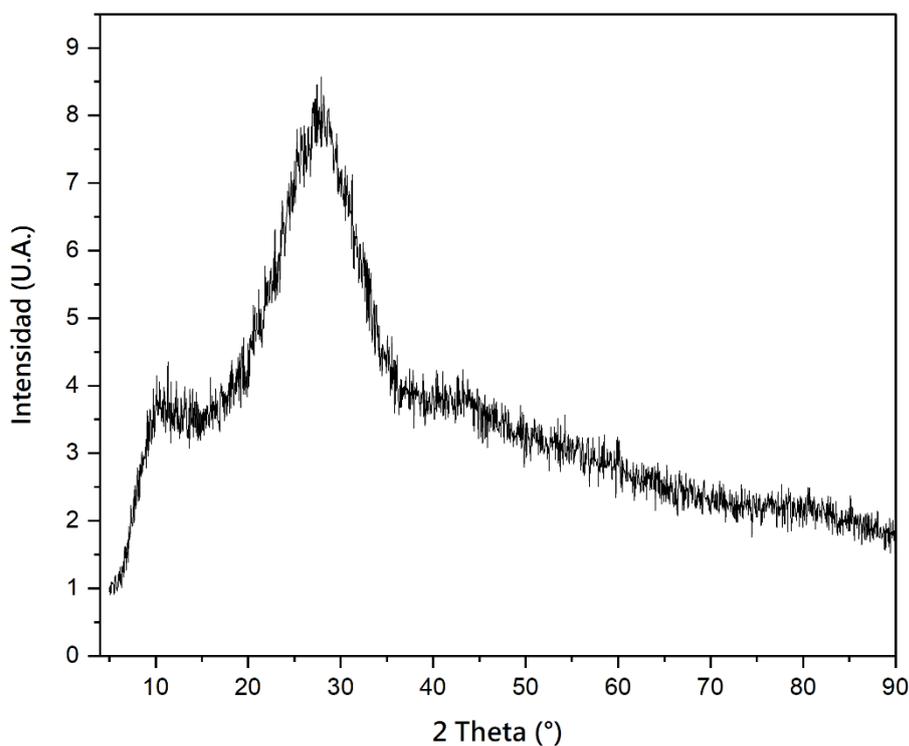


Figura 18. Difractograma obtenido del análisis de VCRT.

En los difractogramas del VCRT y PM, mostrados en las **Figura 18** y **Figura 19**, respectivamente, se puede observar una alta presencia de fase amorfa debido al patrón característico que presenta, lo cual significa que contiene en su mayoría sílice amorfa, como lo menciona *Bernardo E. y Albertini F.* [25] en su investigación, el VCRT está compuesto principalmente por SiO_2 .

En el difractograma de la PM (**Figura 19**), se observa, de nueva cuenta, un patrón característico el cual se le adjudica a la sílice amorfa presente. La única fase cristalina que se puede visualizar es en el pico a los 8° , que corresponde a la biotita ($\text{KFeMg}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH}_2)$), de la que pudo confirmarse su presencia por medio del análisis de FRX que se obtuvo de la PM. Este resultado es comparable con el presentado en el estudio de *Guenanou F. y col.* [57], en el que reportan la presencia de biotita, cuarzo, albita y sanidina.

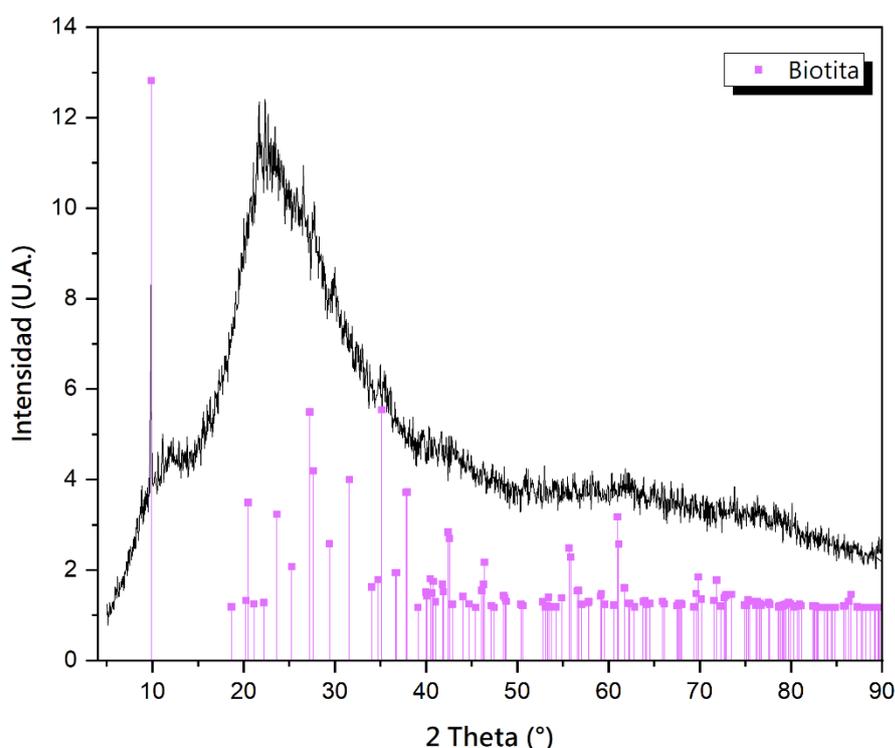


Figura 19. Difractograma obtenido del análisis de PM. Biotita ($\text{KFeMg}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH}_2)$) #01-080-1110

Para el caso de la ES, se analizó con la finalidad de corroborar que el CaCO_3 estuviera presente. El difractograma se presenta en la **Figura 20**, en esta se observó que la única fase cristalina era, como se tenía conocimiento, el CaCO_3 , además este resultado puede comprobarse y ser comparado con el presentado en el estudio de *Souza M.T. y col.* [37] donde ellos comparan el difractograma que resulta al analizar CaCO_3 puro con el obtenido de la cáscara de huevo.

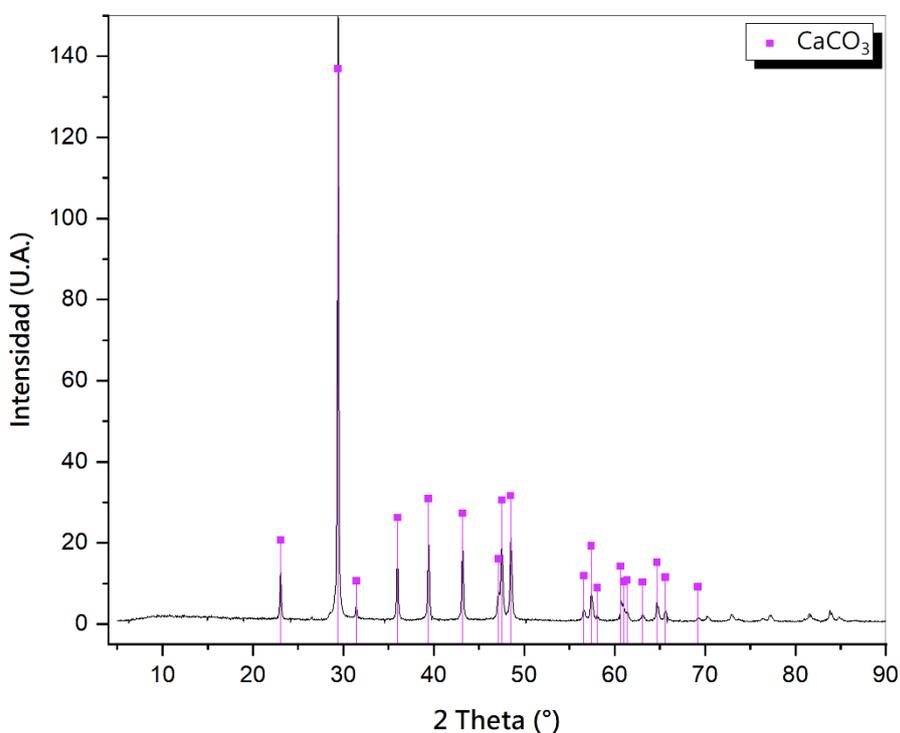


Figura 20. Difractograma obtenido del análisis de ES. Carbonato de Calcio (CaCO_3) #01-086-2334

5.1.2. Análisis Elemental, FRX.

En la **Figura 21**, se muestran las composiciones que se obtuvieron en el análisis del VCRT y la PM.

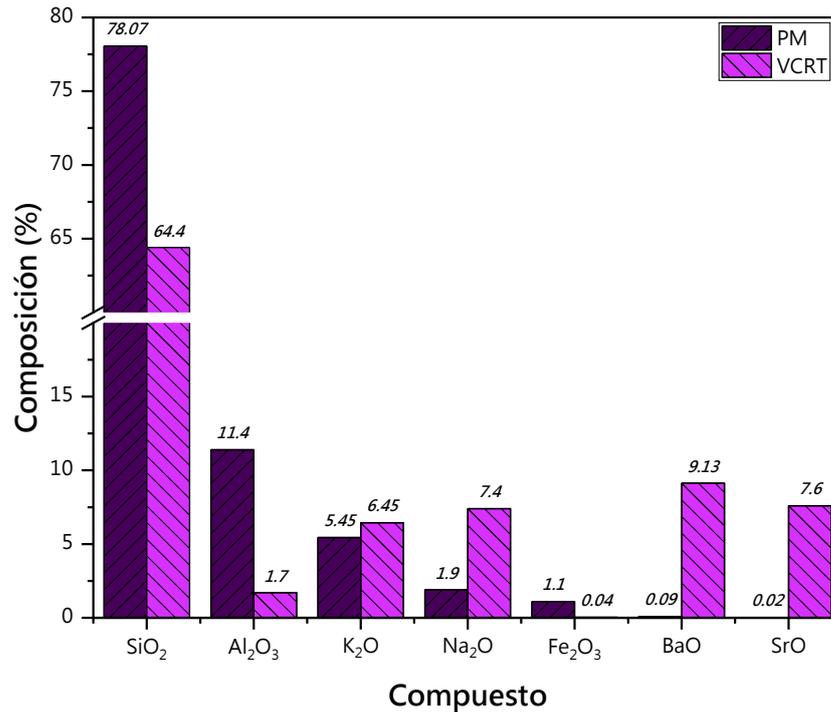


Figura 21. Análisis de FRX para VCRT y PM.

Se puede observar que, para ambos materiales, los componentes mayoritarios son SiO₂, Al₂O₃, K₂O y Na₂O, lo cual es un buen indicador de que pueden ser utilizados para elaborar materiales inorgánicos, además de que estos componentes son los que se utilizan generalmente para la fabricación de vidrio espuma. Por otro lado, se observó que el VCRT presentaba una concentración considerable de óxidos de metales pesados, como son el BaO y SrO, que de acuerdo con Méar F. y col. [58] son componentes que debe tener el vidrio del panel de la televisión, lo que comprueba que el vidrio utilizado es de un aparato electrónico, asimismo, menciona que la presencia de estos óxidos no afecta al coeficiente de expansión térmica, más debido a la baja temperatura de transición vítrea que presentan de 522 °C, no es adecuado su uso para ser utilizado en hornos de altas temperaturas.

A pesar de que estos óxidos son dañinos para la salud, se sabe que debido a que forman parte de una matriz vítrea, no se liberan de ésta a menos que sean lixiviados por medio de un ataque ácido, asimismo, al usar un proceso de espumado por descomposición se disminuye el riesgo de reacciones de oxidación de sustancias carbonosas por la reducción de óxidos fácilmente reducibles, como algunos metales pesados. [25]

En la **Tabla 4**, se muestra el análisis para el ES. En esta se observó que el componente mayoritario presente era el CaCO_3 con aproximadamente un 98 %, lo cual indica que, efectivamente puede ser utilizado como un agente espumante para la creación de poros en el material, además, este compuesto ha sido utilizado en diferentes fuentes como lo son *Zhu M. y col.* [34], *Ji R. y col.* [43], *Chen B. y col.* [59], entre otros, según este criterio se buscó una alternativa sustentable como lo fue la ES.

Los carbonatos (CO_3^{2-}) son utilizados como agentes espumantes, debido a que al descomponerse produce CO_2 en forma gaseosa; este al verse retenido por la fase líquida resultante de la fase amorfa, crea poros por las burbujas generadas y como resultante de esto, se aumenta el volumen de los materiales.

Tabla 4. Análisis de FRX de la ES.

Compuestos	Concentración (%p)
CaCO_3	97.9%
MgCO_3	1.4%
SO_3	0.4%
P_2O_5	0.2%
K_2O	0.1%

5.1.3. Análisis térmico, DTA/TG.

En el análisis térmico se obtuvieron las siguientes gráficas (**Figura 22**) para cada una de las materias primas a utilizar.

En el caso del VCRT, se encontró un evento endotérmico el cual se relaciona a la temperatura de transición vítrea del vidrio, este se dio a los 588 °C. En el caso del análisis termogravimétrico, según literatura, la curva que presenta el VCRT se debe a una etapa de secado o desorción. [52, 53]

Para la PM, también mostró una etapa de secado o desorción la cual se debe al contenido de agua químicamente ligada en el material. Sin embargo, no se logró observar su temperatura de fusión ya que lo marcado en literatura, es que se encuentra por los 1260 – 1340 °C y el equipo utilizado solo maneja una temperatura de hasta 1200 °C. [8]

En la ES, se observaron 2 eventos endotérmicos, el primero a los 347 °C que se debe a la descomposición del carbonato de magnesio ($MgCO_3$) y el segundo empieza a partir de los 663 °C hasta los 815 °C, siendo este la descomposición completa del carbonato de calcio ($CaCO_3$).

Con los eventos térmicos elucidados en este análisis, se comprobó que el rango de temperaturas propuesto para el tratamiento térmico fue el adecuado para alcanzar las descomposiciones y fusiones deseadas, a fin de obtener las propiedades requeridas para el VES.

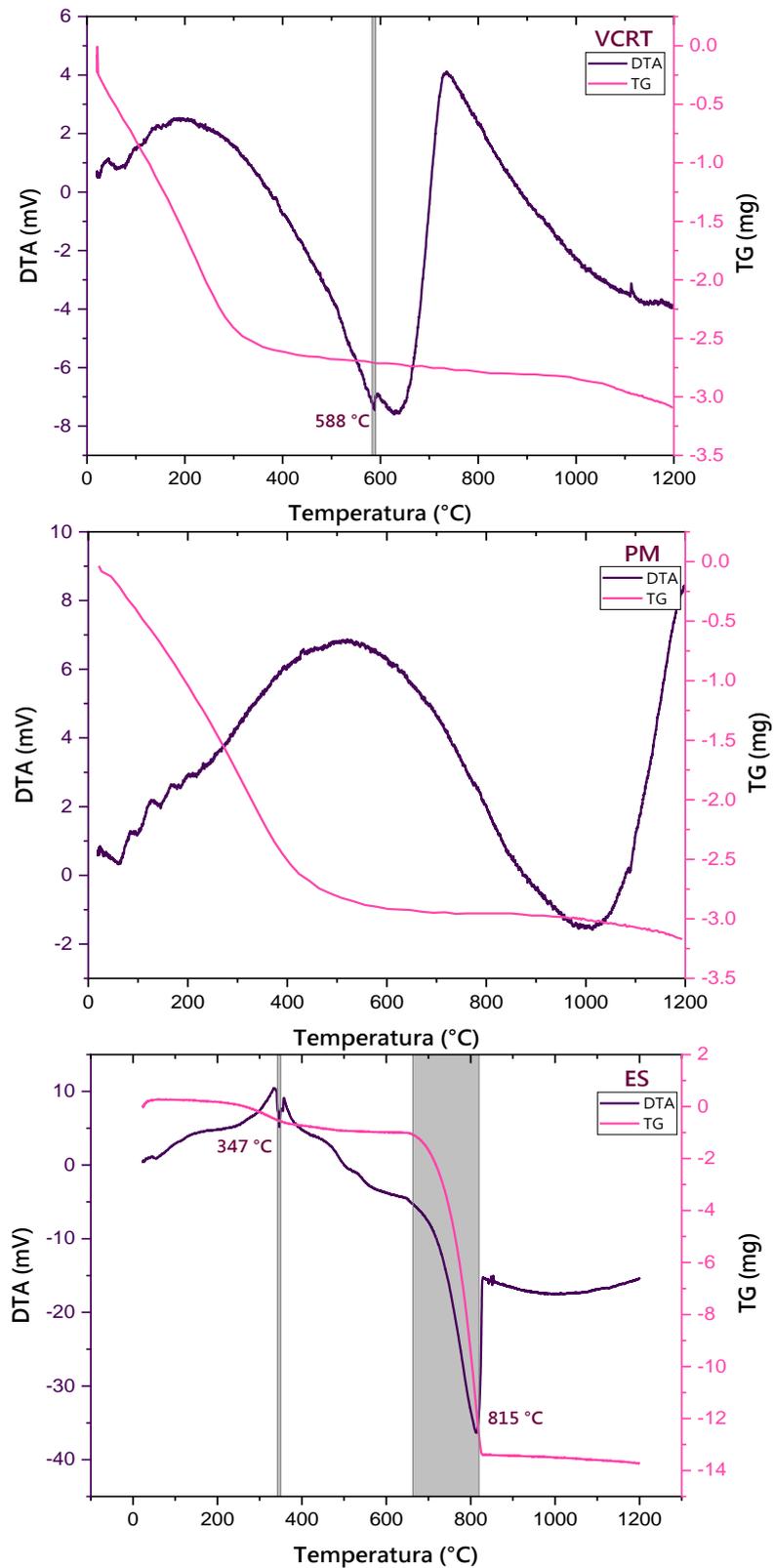


Figura 22. Análisis térmico (DTA/TG) de las materias primas. VCRT [=] Vidrio de tubos de rayos catódicos, PM [=] Perlita Mineral; ES [=] Cáscara de huevo.

5.2. Selección de Agente Estabilizador de Espuma, AEE

El AEE se agregó con la finalidad de mantener la porosidad del VES en un rango similar de tamaño de poro, es decir, que se mantuviera relativamente constante el diámetro de poro en todo el VES, esto para evitar que perjudicara la resistencia a la compresión del material.

En la metodología previamente explicada, se utilizaron 2 tipos diferentes de AEE, los cuales eran Na_3PO_4 y MnO_2 . El Na_3PO_4 podría beneficiar la intensificación de la formación de fase líquida y, además, por su producto de descomposición P_2O_5 , mejorar y estabilizar la uniformidad de los poros en el VES ^[43]; para el caso del MnO_2 , al momento de reducirse el Mn^{4+} a Mn^{3+} , se libera el O_2 , que al aumentar esta generación de gas y se vea limitada por la difusión, ocasionará que la formación de poros sea más controlada y por consecuencia, se tendría una estructura porosa homogénea ^[60]. Estos dos, se probaron en una composición establecida, la cual se seleccionó a partir de la literatura, debido a la similitud de materias primas que se usaron en dicha referencia ^[43], esta mencionaba que era la adecuada para obtener una densidad aparente deseada de 0.7 g/cm^3 a una temperatura de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ y de acuerdo con esto, obtener un VES con una conductividad térmica baja. La composición elegida, según el criterio anterior, fue con un 60 %p de VCRT, 40 %p de PM y los aditivos como se muestra en la **Tabla 5**. La finalidad de probar los distintos AEE en esta forma, fue para evitar que el diseño de experimentos de bloques arrojara una cantidad elevada de VES a sinterizar. Otra consideración que se realizó fue que el AA fue agua, se decidió no experimentar con el PVA ya que lo que se deseaba observar era como

afectaba el AEE en el VES y si cumplía con la función de mantener la porosidad de un rango de tamaño.

Tabla 5. Composición del vidrio espuma para la selección de AEE.

Materia prima	Porcentaje en peso (%p)	Gramos
VCRT	60	15.0
PM	40	10.0
ES	1	0.3
Bórax	20	5.0
AEE (Na ₃ PO ₄ o MnO ₂)	2	0.5
Total=	123%	30.8
AA (Agua)		5 mL

Para seleccionar el AEE, se procedió a realizar la prueba de absorción de agua y un análisis de distribución y tamaño de poro.

En la prueba de absorción de agua, se obtuvieron diferentes resultados para cada AEE, donde a los VES de prueba se les denominó P1 al que contenía Na₃PO₄ y P2 con MnO₂; de cada uno se hicieron 3 repeticiones, estos se presentan en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Análisis de Absorción de agua con diferente AEE.

Muestras	V (cm ³)	P (%)	B (g/cm ³)	Promedio P (%)	Promedio B (g/cm ³)
P11	33.39	52.08	0.80		
P12	36.48	45.66	0.74	46.1	0.76
P13	35.73	42.49	0.75		
P21	37.67	56.53	0.72		
P22	36.36	55.50	0.74	56.1	0.73
P23	37.72	56.16	0.72		

P1 [=] AEE Na₃PO₄; P2 [=] AEE MnO₂; V [=] Volumen exterior; P [=] Porcentaje de porosidad aparente; B [=] Densidad aparente.

Como se puede observar en la **Tabla 6**, los VES sinterizados P2 presentaron una densidad aparente similar a la obtenida en las investigaciones de *Ji R. y col.*^[43] y *Chen Z. y col.*^[42], que, de acuerdo con lo reportado por estos autores los vidrio espuma con un valor de densidad de 0.7 g/cm³ exhibirían una conductividad térmica en el rango de 0.30 – 0.40 W/m*K. Este rango de conductividad es comparable con un vidrio espuma comercial ya que este presenta un valor de 0.36 W/m*K.^[61] Además, se obtuvo un porcentaje de porosidad mayor con un valor de 56 %; como bien se conoce por literatura a mayor porosidad, se obtiene una menor conductividad térmica^[62], esto se debe al aire atrapado en la porosidad cerrada y para el caso de la porosidad abierta, elimina la resistencia en la transferencia de calor, por lo que se fuga con mayor rapidez el calor que atraviesa al material.

Para sustentar la elección del AEE, se procedió a realizar un análisis de distribución y tamaño de poro. Los resultados fueron tomados de los 3 VES

con cada AEE e incorporados en una sola gráfica, los VES se muestran en la **Figura 23** y **Figura 24**.

De acuerdo con las Figuras presentadas, con el uso de Na_3PO_4 como AEE se obtuvo una porosidad muy variada, desde poros pequeños hasta algunos de mayor tamaño. En contraste, cuando se utilizó MnO_2 , presentó una porosidad homogénea en casi todo el VES. Para confirmar lo que las imágenes muestran, se realizó un análisis de distribución de tamaño de poro.

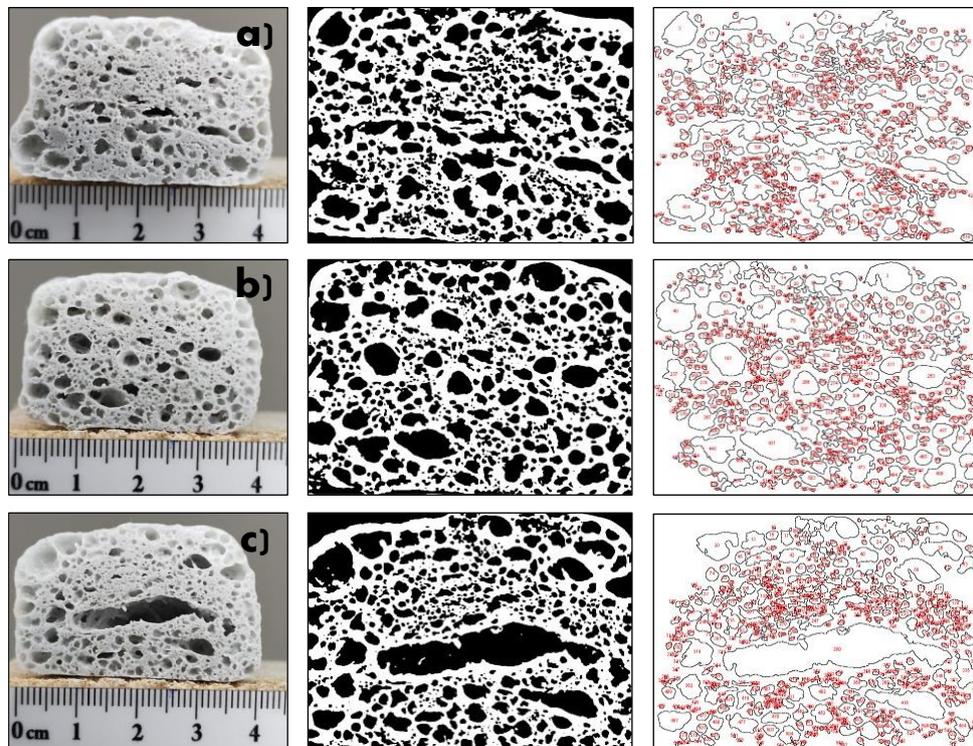


Figura 23. Porosidad presente en el VES sinterizado con Na_3PO_4 ; a) P11, b) P12, c) P13.

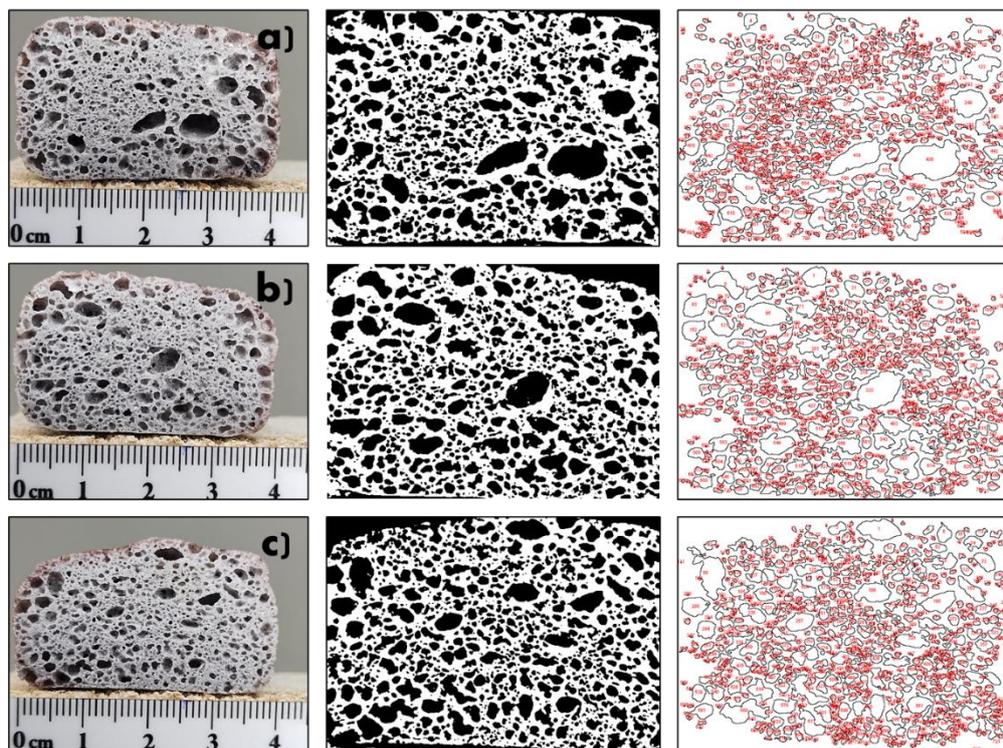


Figura 24. Porosidad presente en el VES sinterizado con MnO_2 ; a) P21, b) P22, c) P23.

Al usar Na_3PO_4 como AEE, se obtuvieron las mediciones de diámetro de poro que se presentan en la **Figura 25**. Como se puede observar, se tenían intervalos muy variados ya que estos se presentaban desde 0.01 hasta 2.0 cm; alrededor de 1608 poros eran de tamaño menor a 0.3 cm, y se puede observar que 2 poros se encontraban en el rango de los 2 cm, esto quiere decir que, de los 3 VES, 2 de estos tenían un poro de mayor tamaño. Al tener presente porosidad variable, ocasiona que el material falle rápidamente al aplicar presión porque se comportarían como grietas, haciendo que el material sea frágil y por consecuencia, no se obtenga una buena resistencia a la compresión.

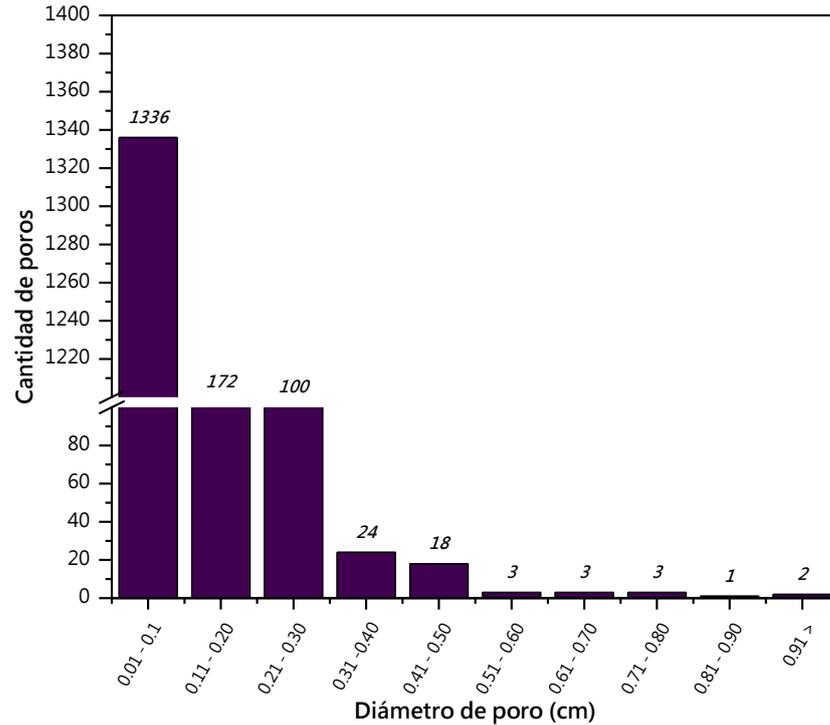


Figura 25. Distribución de tamaño de poros en el VES con Na_3PO_4 como AEE.

Para el VES con MnO_2 , se presentaron rangos de tamaño de poro menores a 0.80 cm como se muestra en la **Figura 26**, lo que indica que la pieza contenía una porosidad de menor tamaño, reduciendo la problemática de que el poro llegara a comportarse como una grieta y así, reducir la resistencia a la compresión. Más de 2000 poros que es el 97% de la porosidad total, se mantuvieron en el rango menor de 0.3 cm que comparando con el AEE de Na_3PO_4 , se obtuvo una mayor cantidad de poros pequeños, demostrando que el MnO_2 cumple con la función de mantener homogeneizado el tamaño de poro en el VES. Además, se observó que con el uso de MnO_2 , se obtenía un mayor porcentaje de porosidad, lo que beneficiaría a disminuir la conductividad térmica, como lo menciona la definición de un material térmicamente aislante.^[62] De acuerdo con lo analizado en los resultados, se puede concluir que el compuesto que cumplió con la función de AEE y fue el

indicado para obtener un VES con las propiedades deseadas, resultó ser el MnO_2 .

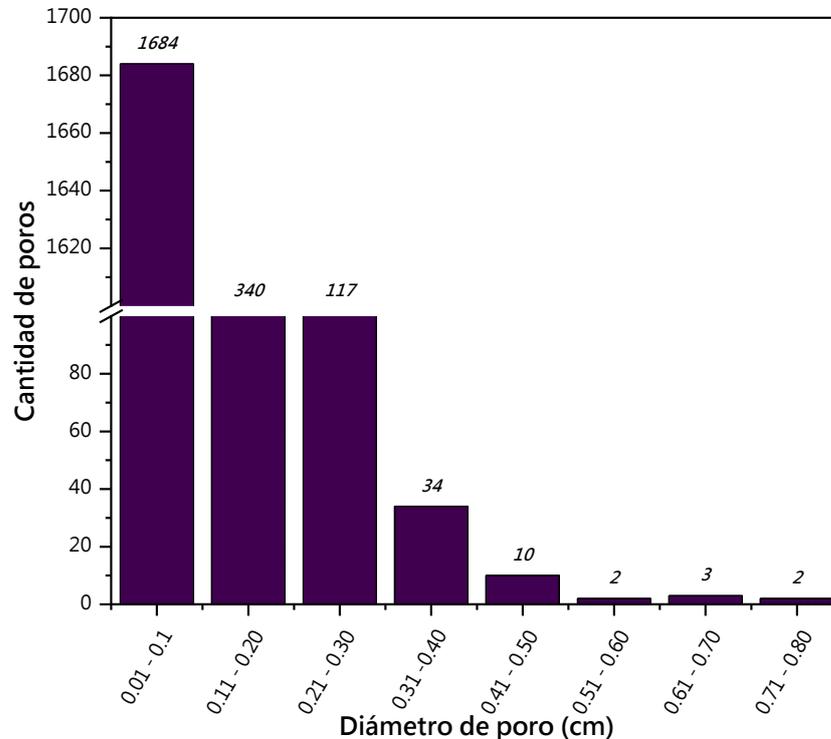


Figura 26. Distribución de tamaño de poros en el VES con MnO_2 como AEE.

5.3. Selección de Agente Aglomerante, AA

El AA se usó con la finalidad de hacer una pasta antes del prensado para obtener un vidrio espuma de tamaño 3 x 3 x 2.5 cm y forma cúbica, así como para facilitar el prensado de las composiciones a experimentar. Los AA que se usaron para esta prueba fueron agua destilada y alcohol polivinílico 0.5 %p.

De nueva cuenta, la composición elegida fue con un 60 %p de VCRT, 40 %p de PM y los aditivos como se muestra en la **Tabla 7**, esto con el fin de comparar los resultados con los VES preparados anteriormente en la selección del AEE.

Tabla 7. Composición del vidrio espuma para la Selección de AA.

Materia prima	Porcentaje en peso (%p)	Gramos
VCRT	60	15.0
PM	40	10.0
ES	1	0.3
Bórax	20	5.0
AEE (MnO ₂)	2	0.5
Total=	123%	30.8
AA (Agua o PVA)	5 mL	

El PVA es uno de los principales agentes aglomerantes en la cerámica, ya que proporcionan una alta resistencia en el cuerpo en verde. [63]

Para comparar el AA de PVA con el agua destilada, se procedió a realizar la prueba de absorción de agua y un análisis de distribución y tamaño de poro.

En la prueba de absorción de agua, se obtuvieron los resultados para el AA de PVA, donde a los VES de prueba se les denominó PVA del cual se hicieron 3 repeticiones, estos se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Análisis de Absorción de agua para el AA de PVA.

Muestras	V (cm ³)	P (%)	B (g/cm ³)	Promedio P (%)	Promedio B (g/cm ³)
PVA1	37.03	40.89	0.74		
PVA2	38.83	43.37	0.70	43.5	0.72
PVA3	38.74	46.36	0.71		

V [=] Volumen exterior; P [=] Porcentaje de porosidad aparente; B [=] Densidad aparente.

Como se puede observar, se obtuvo un VES con una densidad muy similar a la presentada en literatura, que al compararla con la del VES con

MnO₂ y agua destilada como AA (**Tabla 6**), no muestra un cambio representativo a excepción de la porosidad, que, al usar el PVA, mostró un menor porcentaje de esta. Además, en la **Figura 27**, se muestran las imágenes del vidrio espuma con PVA donde se puede observar la porosidad que estas presentan.

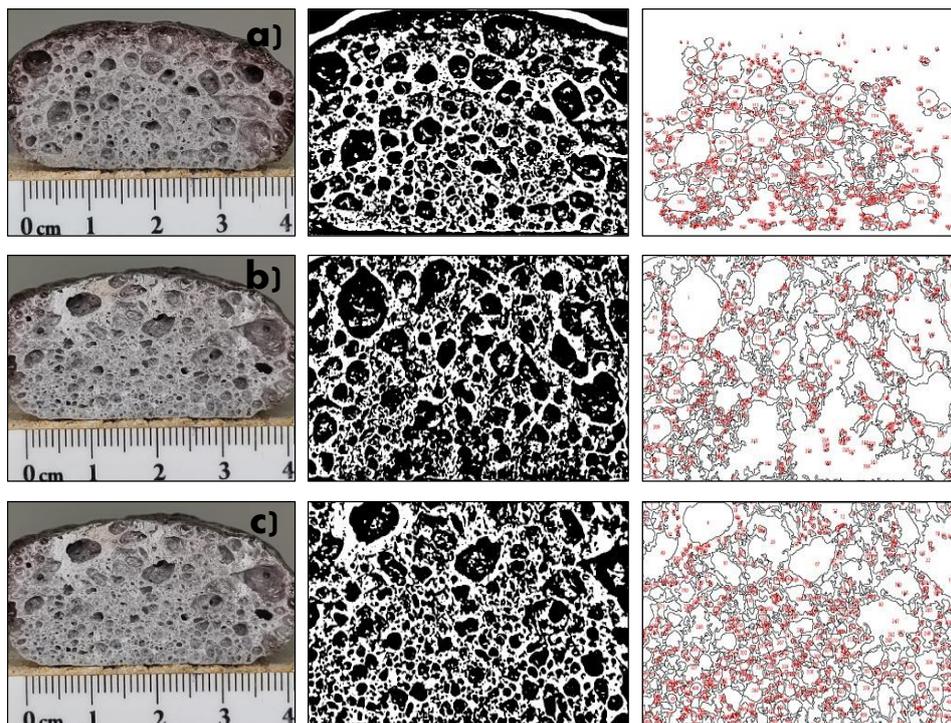


Figura 27. Porosidad presente en el VES sinterizado con PVA; a) PVA1, b) PVA2, c) PVA3.

Para sustentar este análisis, se procedió a realizar, también, un análisis de distribución y tamaño de poro basado en la metodología previamente explicada.

Como se muestra en la **Figura 28**, se obtuvieron intervalos de tamaño de poros mayor, ya que se obtuvieron 11 poros de 0.91 cm o más, lo que ocasionaría que el VES no tenga una porosidad homogeneizada y, además, estos poros disminuirían la resistencia a la compresión que pueda presentar el vidrio espuma, la cual es una propiedad que se desea sea de un valor

competitivo contra la de los productos comerciales. Asimismo, la porosidad que presentan estos VES es de menor porcentaje lo que haría que la conductividad térmica se eleve y no se obtenga un valor similar al esperado de 0.30 – 0.40 W/m K, como lo marca la literatura. [34, 42, 43]

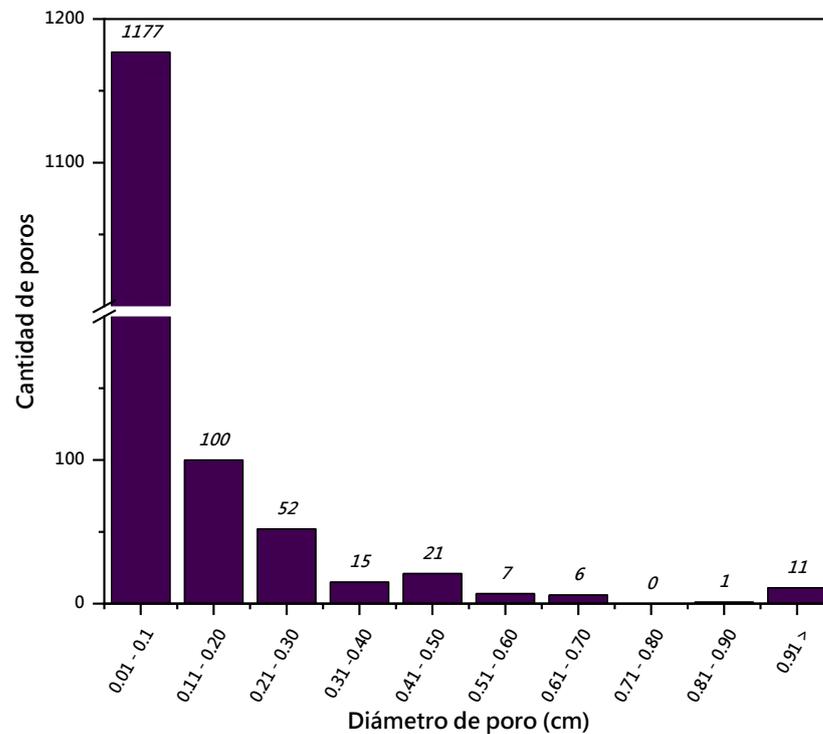


Figura 28. Distribución de tamaño de poro en el VES con AA de PVA.

Se llegó a la conclusión con estos resultados, que el PVA no ayuda a las propiedades deseadas en el vidrio espuma que se pretende sinterizar, sino al contrario, ya que disminuye el porcentaje de porosidad y no mantiene el tamaño de poro estable, además, el uso de PVA disminuiría la sustentabilidad del proyecto afectando al objetivo de desarrollo sostenible 12 Producción y consumo responsable, ya que este tiene la meta de gestionar ecológicamente racional los productos químicos y todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio

ambiente.^[64] Asimismo, su uso aumentaría el costo de producción, en caso de que este sea llevado a escala industrial, es por esto que se eligió el agua destilada como el AA.

5.4. Sinterización del Vidrio Espuma

La sinterización del vidrio espuma se llevó a cabo con las 5 composiciones mostradas en la **Tabla 1** en una mufla Carbolite a 5 diferentes temperaturas: 600, 650, 700, 750 y 800 °C. Cada composición se realizó por triplicado obteniendo un total de 75 VES (**Figura 29**).

Para los VES a las temperaturas de 600 y 650 °C, no se observó una porosidad presente, debido a que el CaCO_3 empieza a descomponerse alrededor de los 800 °C, por lo que no logró liberarse el gas de CO_2 .

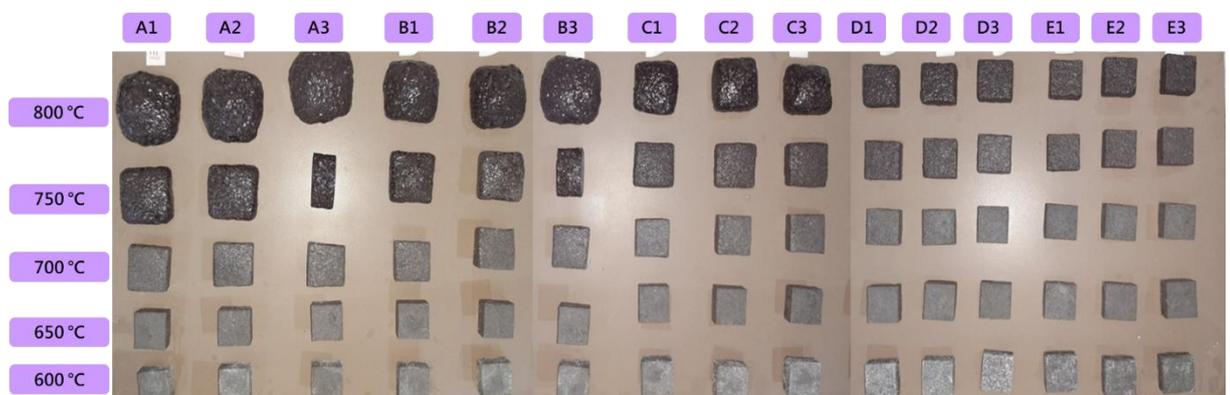


Figura 29. VES con diferentes composiciones y temperaturas.

5.5. Caracterización de Vidrio espuma sinterizado

5.5.1. Absorción de agua, ASTM C373.

Para el análisis de absorción de agua, se procedió a colocar los VES en el equipo ISOVACUUM, donde se llevaba a cabo el programa previamente

explicado en la metodología. Debido a que algunos VES, como los de las composiciones A y B a 800 °C emergían del agua, se les colocó dos separadores de metal en la parte superior de la canastilla para lograr y cumplir, como marca la metodología de la prueba, se mantuvieran sumergidos completamente.

Con las composiciones que emergían del agua, se llegó a la conclusión que fue debido a que estas presentaban un porcentaje de porosidad muy alto de aproximadamente 65% o más, por lo que tendían a no retener el agua.

A cada VES, se le tomó su peso seco, peso saturado y el peso suspendido, a partir de los valores que resultaron, se realizaron los cálculos con las ecuaciones 2 y 3, obteniendo la densidad y porosidad aparente para cada uno. Una vez obtenido el valor, se realizó un promedio de los 3 VES por cada composición para graficarlos y obtener un análisis estadístico con el comportamiento de los VES conforme a estas propiedades.

La densidad aparente (B) que presentaron los VES, se muestra en la **Figura 30.**

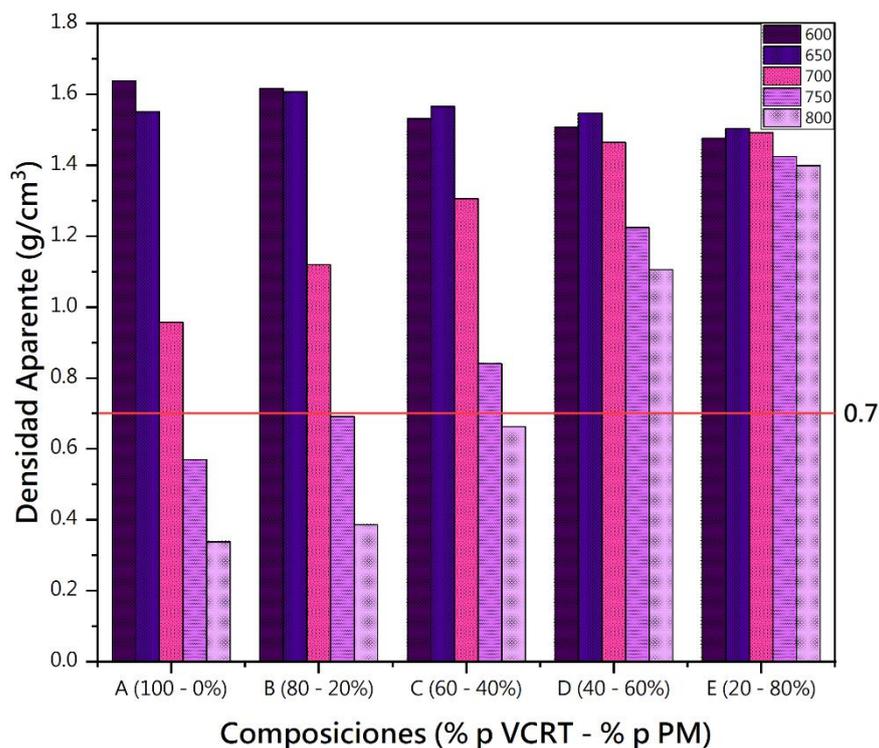


Figura 30. Densidad aparente presente en los VES a diferentes temperaturas y composición.

Como se esperaba, los VES presentaron distintos valores de densidad aparente. Primeramente, se puede observar que las composiciones con mayor porcentaje en peso de VCRT, tenían una disminución en la densidad conforme se aumentaba la temperatura de sinterización. Esto es debido a que al someterlos a una temperatura mayor se favorecía la fusión del VCRT y se tenía una mayor cantidad de fase líquida por lo que, cuando el CaCO_3 comenzaba a descomponerse, alrededor de los $660\text{ }^\circ\text{C}$, el gas de CO_2 quedaba retenido en la fase y así, se genera la porosidad del material. [43, 59] Al mismo tiempo, es conocido que, a mayor porosidad, se tendrá una densidad menor ya que el VES o el material tendrá mayor cantidad de cavidades y aire atrapado, para el caso de la porosidad cerrada.

Se colocó una línea de referencia a los 0.7 g/cm^3 para seleccionar la composición con la que se obtendría un VES con una densidad aparente similar, ya que según lo reportado por de *Ji R. y col.* [43] y *Chen Z. y col.* [42], los vidrios espuma con ese valor de densidad exhibirían una conductividad térmica menor a 0.40 W/m K . Los VES que obtuvieron una densidad aparente similar fueron las composiciones A (100 – 0 %) y B (80 – 20 %) a $750 \text{ }^\circ\text{C}$, con un valor de 0.57 g/cm^3 y 0.69 g/cm^3 , respectivamente y la composición C (60 – 40 %) a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ que obtuvo una B de 0.66 g/cm^3 .

Para la porosidad aparente (P) que presentaron los VES de cada composición, se obtuvieron los valores mostrados en la **Figura 31**.

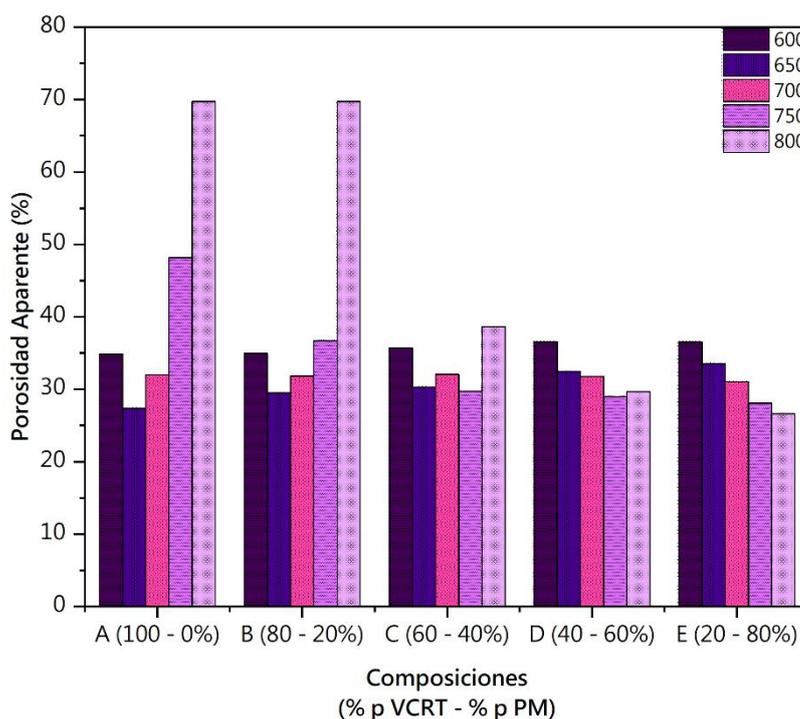


Figura 31. Porosidad aparente presente en los VES a diferentes temperaturas y composiciones.

Como se puede observar, los VES que presentaron un mayor porcentaje de porosidad aparente, entre el rango de 30 – 70 %, fueron aquellos que se

sinterizaron a temperaturas superiores a los 700 °C y con una mayor cantidad de VCRT.

Además, se comprueba lo mencionado anteriormente, que, a mayor porosidad, se tiene una B de menor valor, como es en el caso de las composiciones A y B a 800 °C, estas presentan una porosidad del 69.7 % y su densidad es de 0.34 y 0.4 g/cm³, solo que estas no fueron seleccionadas como vidrios espuma óptimos, ya que su densidad estaba muy por debajo del deseado. De igual manera, estos VES presentan poros grandes en la superficie, esto es debido a que con mayor porcentaje de VCRT, se genera mayor fase líquida y al tener una temperatura elevada de 800 °C, la generación de CO₂ se acelera continuamente, logrando que el gas se escape y los poros pequeños se unan con los más grandes haciendo que el VES llegue a colapsar.^[59, 65]

Asimismo, para los VES que obtuvieron una B similar, que son las composiciones A y B a 750 °C y la composición C a 800 °C, presentan valores de 48%, 37% y 39% respectivamente.

5.5.2. Análisis Cristalográfico, DRX.

Para los VES con las composiciones prometedoras, se realizó un análisis de DRX para observar las fases cristalinas presentes, como se puede apreciar en la **Figura 32**.

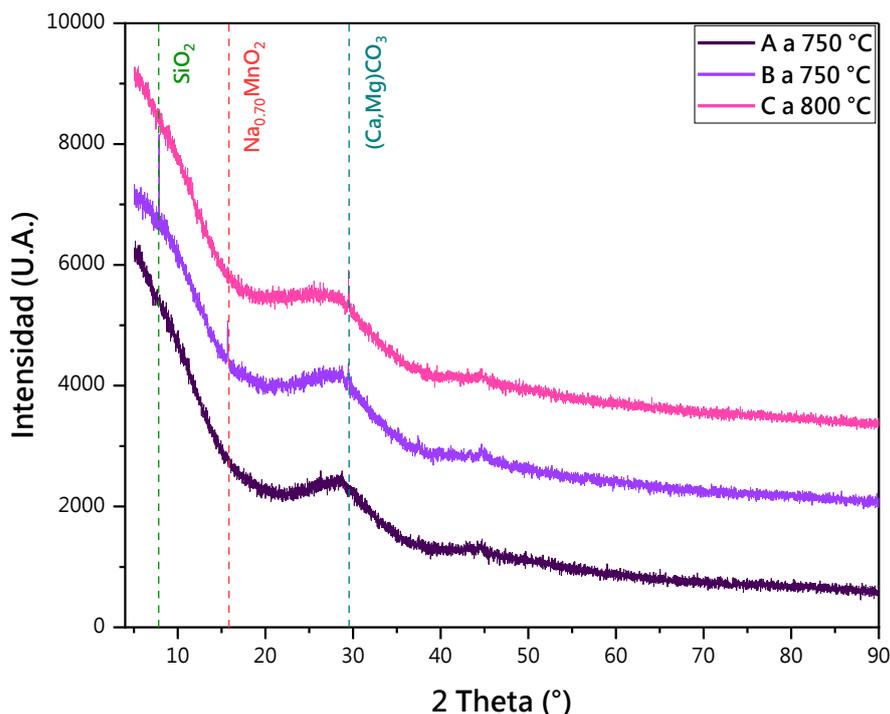


Figura 32. Diffractograma obtenido del análisis de los VES con las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C. Óxido de silicio (SiO_2 , #00-050-1703), óxido de manganeso sódico ($\text{Na}_{0.70}\text{MnO}_2$, #00-027-0751) y calcita magnésica ($(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$, #01-086-2335)

Primeramente, para la composición A a 750 °C, con 100 %p de VCRT y 0 %p de PM, no se observó ninguna fase cristalina, más si una curva característica de la sílice amorfa, esto se debe a que el mayor contenido de este VES es VCRT.

En cambio, en la composición B sinterizada a la misma temperatura, pero con 80 %p de VCRT y 20 %p de PM, se identificaron 3 picos característicos. El primero se presentó a los 7°, el cual podría ser la fase de óxido de silicio (SiO_2), el segundo se encuentra a los 15° el cual se puede aludir a la fase de óxido de manganeso sódico ($\text{Na}_{0.70}\text{MnO}_2$), el cual se podría formar por el contenido remanente de MnO_2 y por la descomposición del bórax o borato de sodio, ya que al suceder la reacción de descomposición resultan dos productos, óxido boro y óxido de sodio (Na_2O) [32, 39], el tercer y último pico

característico en este VES, fue identificado a los 29° como calcita magnésica ((Ca, Mg)CO₃) probablemente formada por la descomposición incompleta del CaCO₃, esto se debe a que el vidrio espuma solo fue llevado hasta una temperatura de sinterización de 750 °C y como se pudo observar en el análisis de DTA/TG (**Figura 22**), el CaCO₃ termina su reacción de descomposición hasta los 815 °C. Por lo tanto, para la composición C a 800 °C con 60 %p de VCRT y 40 %p de PM, se encontró solamente, la misma fase de calcita magnésica.

Cabe aclarar que estas fases pueden estar presentes en los VES y se pudo discernir entre otras fases cristalinas gracias al análisis de FRX (**Figura 21** y **Tabla 4**) que se realizó a cada materia prima, más no se pueden confirmar debido a la cantidad de fase amorfa que se tiene en cada composición.

5.5.3. Análisis de distribución y tamaño de poro.

El análisis de distribución y tamaño de poro se les realizó a las 3 composiciones que presentaron una B similar a la conocida por literatura. Las composiciones sometidas a este análisis fueron A y B a 750 °C y C a 800 °C.

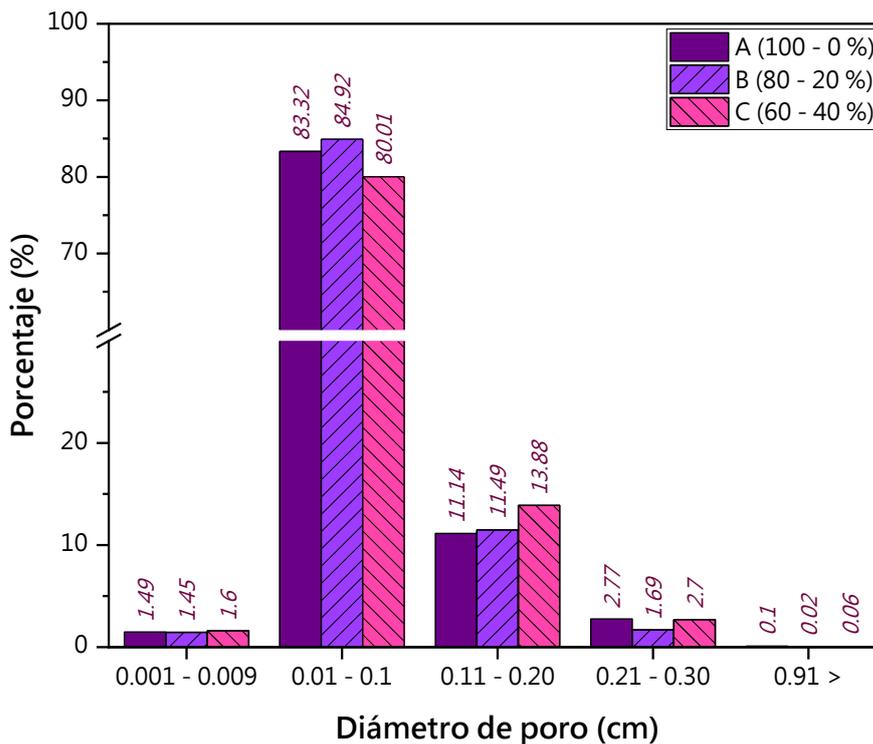


Figura 33. Distribución del tamaño de poro para las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C.

El porcentaje para cada intervalo de diámetro de poro y composición se presenta en la **Figura 33**. Como se puede observar, la composición B con 80 %p de VCRT y 20 %p de PM tiene un 84.9% de poros con diámetro entre 0.01 – 0.1 cm (0.01 – 1 mm) de la porosidad total en las 3 repeticiones. Esto se debe a que, al tener una temperatura de sinterización de 750 °C, el porcentaje en peso de la fase vítrea, es decir el VCRT, se encuentra cercano a su temperatura de transición vítrea (588 °C) por lo que solo se llega a reblandecer y generar una proporción de fase líquida, es por esto por lo que al liberarse el CO₂ se retenía por la baja viscosidad presentada, logrando así un control en el crecimiento del poro. Para el caso de la composición A, al contener mayor porcentaje en peso del VCRT, a pesar de su temperatura de sinterización, se intensificó la proporción de generación de la fase líquida por lo que, muchos

de los poros pequeños se unieron con los de mayor tamaño al generarse el CO₂ en gas, además de que este último, al escaparse del VES, debilitó las paredes de los poros en la superficie por la presión del gas, lo que ocasionó que el VES de la composición A presentara una morfología con variados tamaños de poro y grietas lo que provocaría que el material presentara una resistencia a la compresión baja. En el caso de la composición C, la temperatura de transición vuelve a jugar un papel importante, al elevar la temperatura hasta 800 °C, la generación de fase líquida aumenta nuevamente, por lo que sucede el mismo fenómeno que en la composición A.

Asimismo, según lo reportado por Østergaard M. y col. ^[66], cuando el poro del vidrio espuma es superior a 1 – 5 mm, la conductividad térmica aumenta, esto debido a la convección que tienen los poros de mayor tamaño en la transferencia de calor.

Tabla 9. Resultados del diámetro de poro presentado en los VES.

VES	Diámetro de poro (cm)	Promedio de Diámetro de poro (cm)
A1_750	0.067	
A2_750	0.054	0.058
A3_750	0.052	
B1_750	0.049	
B2_750	0.050	0.049
B3_750	0.049	
C1_800	0.053	
C2_800	0.060	0.057
C3_800	0.058	

A#_750 [=] Composición A a 750 °C, repetición #

B#_750 [=] Composición B a 750 °C, repetición #

C#_800 [=] Composición C a 800 °C, repetición #.

De acuerdo con el diámetro promedio de poro de cada composición, mostrados en la **Tabla 9**, se puede decir que la composición B tuvo un intervalo de diámetros casi invariable, obteniendo un diámetro promedio de 0.049 cm (0.49 mm), el cual beneficiaría a la conductividad térmica resultando un valor bajo y en un aumento de la resistencia a la compresión. Además, las composiciones A y C presentaron valores mayores, lo que podría ocasionar que estas no fueran las adecuadas para obtener un vidrio espuma con buen aislamiento térmico.

Además, se realizó la prueba de normalidad (Distribución normal). Una distribución normal de datos es aquella que presenta una distribución (gráfico) en forma de campana, en las cuales las desviaciones estándar superiores e inferiores establecen ciertos valores de referencia con respecto a la media, esto es con el fin de estimar el porcentaje de los datos que se encuentran en cada límite superior o inferior.

Para verificar la normalidad de los datos de la porosidad, se realizó un análisis conocido como Prueba de Normalidad en el software Minitab Statistical®. Los resultados de esta prueba de normalidad indican si se debe rechazar o no la hipótesis de que los datos provienen de una población distribuida normalmente. Se basan en distintos tipos de pruebas de normalidad, el análisis realizado fue a partir de la prueba de normalidad de Ryan - Joiner, que evalúa la normalidad al calcular la correlación entre los datos experimentales y los puntos normales. Su criterio para aceptar o rechazar la hipótesis de que existe normalidad, es con el coeficiente de correlación; si este es cercano a 1, es probable que la población sea normal.^{[67,}

Para cada composición prospecta, se realizó este análisis donde se tomaron en cuenta las 3 repeticiones de cada una y esos datos fueron los capturados en Minitab.

En la composición A a 750 °C mostrada en la **Figura 34**, se obtuvo un valor de correlación de 0.711, donde de acuerdo con el criterio de esta prueba de normalidad, los datos recabados para el diámetro de poro en esta composición no siguen una distribución normal. Con este resultado, también se puede predecir que la composición A no tendrá un valor alto en resistencia a la compresión, ya que su tamaño de poro no es uniforme.

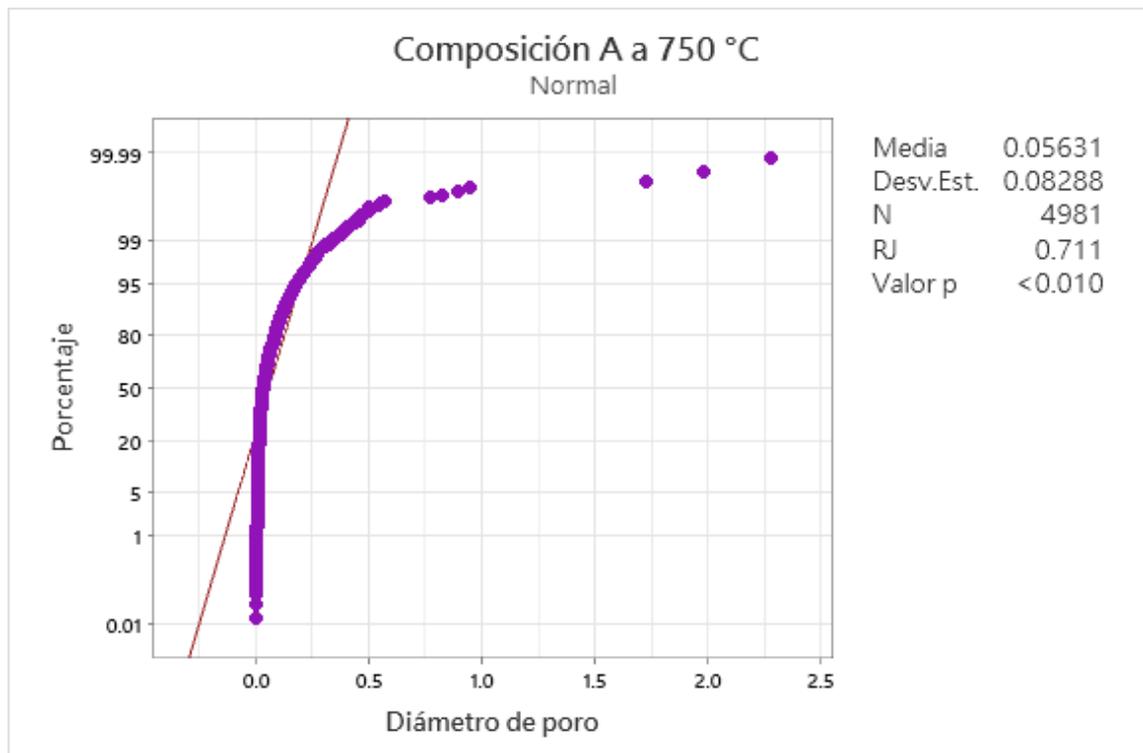


Figura 34. Prueba de Normalidad para la composición A a 750 °C. (Gráfica arrojada por Minitab)

Para el caso de la composición B a 750 °C, se muestra su prueba de normalidad y distribución en la **Figura 35**. La distribución de esta composición

obtuvo un valor de correlación de 0.839, el cual es cercano al criterio de la prueba de normalidad, lo que demuestra que los datos de diámetro de poro para la composición B a 750 °C son probables a seguir una distribución normal. En base a este resultado, también se puede predecir si resultará con una resistencia a la compresión alta, ya que su tamaño de poro se encuentra uniforme en todo el material, por lo que deberá obtener el valor a la resistencia más alto entre las 3 composiciones prospectas.

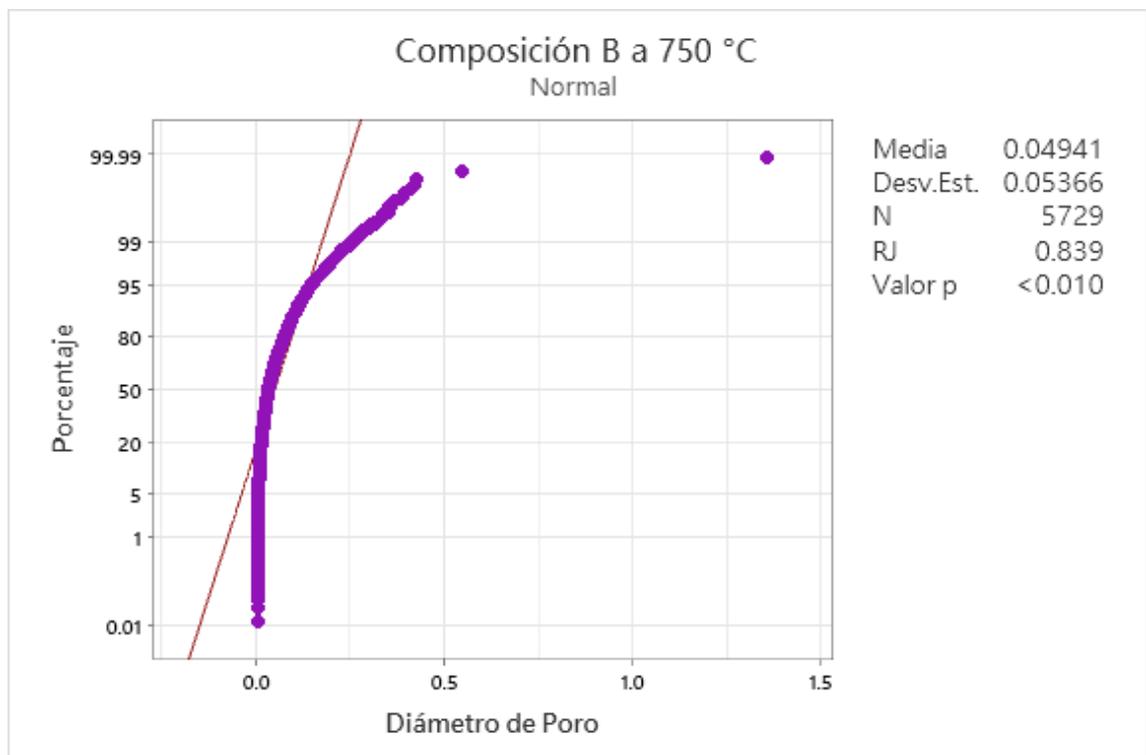


Figura 35. Prueba de Normalidad para la composición B a 750 °C. (Gráfica arrojada por Minitab)

En la composición C a 800 °C mostrada en la **Figura 36**, se obtuvo un valor de correlación de 0.799, donde de acuerdo con el criterio de esta prueba de normalidad sucedió lo similar a la composición A, por lo que, los datos no siguen una distribución normal. Con este resultado, de igual manera se puede predecir que esta composición tampoco tendrá un valor alto en resistencia a

la compresión, basado en la referencia de que su tamaño de poro no es uniforme.

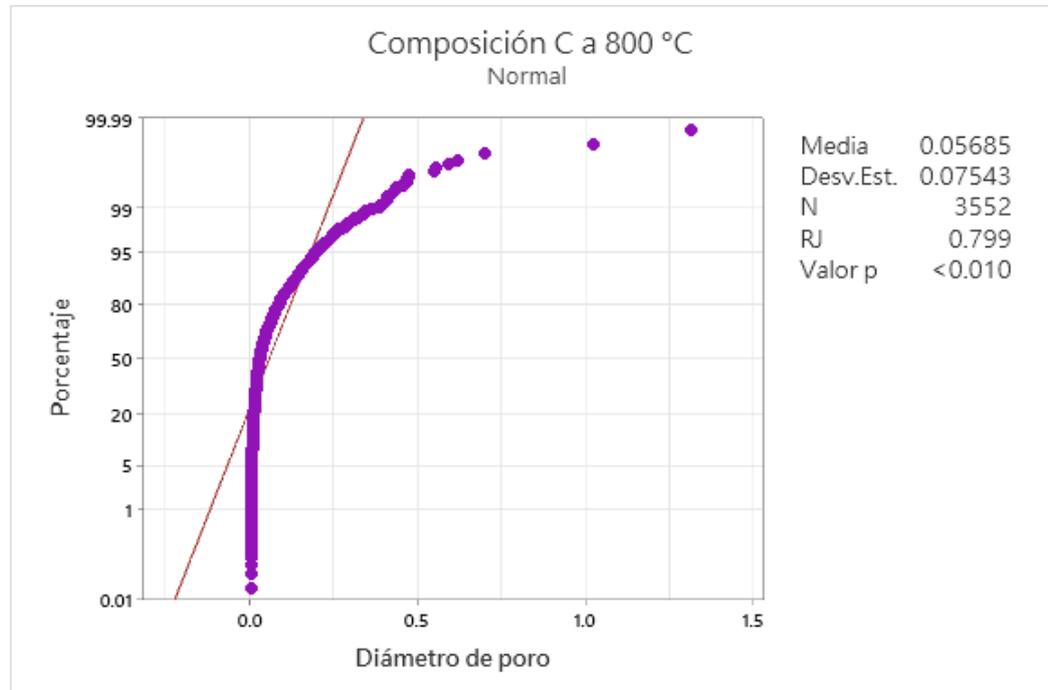


Figura 36. Prueba de Normalidad para la composición C a 800 °C. (Gráfica arrojada por Minitab)

5.5.4. Análisis de Conductividad Térmica.

En el análisis de conductividad térmica se basó en la norma ASTM E1530 [55], donde se registraron las conductividades térmicas de las tres composiciones prometedoras con sus respectivas repeticiones, es decir, la composición A y B a 750 °C y la composición C a 800 °C.

El vidrio espuma comercial tiene una conductividad térmica entre el rango de 0.038 and 0.055 W/m*K [69]. Actualmente, algunos estudios donde se elabora este material a partir de residuos, han obtenido valores similares, como lo son Souza M. T y col. con un rango de 0.055 – 0.177 W/m*K [37], Méar F. y col. con rangos menores de 0.08 – 0.042 W/m*K [65], Østergaard M. B. y

col. encontraron valores de $0.049 - 0.057 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ [66]. De igual manera, se han elaborado espumas cerámicas con vidrio de desecho y para estos casos, también se han encontrado valores de conductividad térmica menores, como en el caso de *Mi H. y col.* quienes obtuvieron un intervalo de conductividades entre $0.070-0.121 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ [70] así como, *Zhu M. y col.* con un valor de $0.36 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ [34]. A pesar de que algunos han sido valores elevados comparándolos con el que presenta el vidrio espuma comercial, sigue manteniéndose en el criterio de aislante térmico, ya que como se ha mencionado, un material aislante debe tener una conductividad térmica menor a $1 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. [17]

De acuerdo con lo previamente explicado, se presentan los valores de conductividad térmica para las composiciones prometedoras en la **Figura 37**.

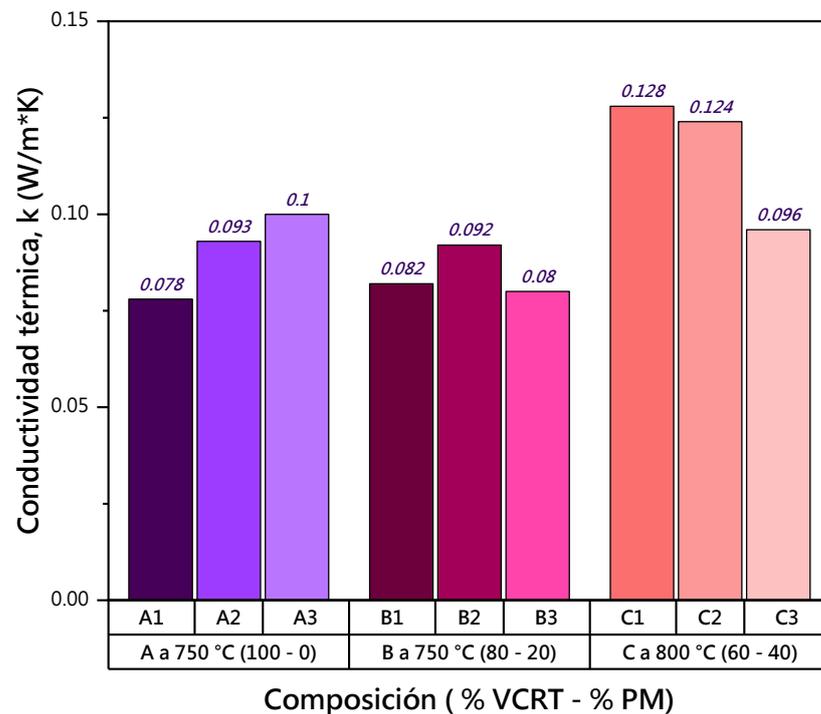


Figura 37. Análisis de Conductividad térmica para las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C.

Como se puede observar, la composición B a 750 °C es la que tiene valores menores de conductividad térmica y los mantiene estables, dando un promedio de 0.085 W/m*K. En cambio, en la composición A y C, presentan valores ligeramente elevados a comparación de la composición B, dando un promedio de 0.090 y 0.116 W/m*K, respectivamente.

Los valores mayores de conductividad de los VES A y C, se relacionan directamente con su microestructura.

La composición A presentó una conductividad térmica muy cercana a la que presentó la composición B, teniendo un valor promedio de 0.090 W/m*K, esto se debe, principalmente, a su microestructura y a la estructura amorfa que presenta (**Figura 32**). Al ser sílice amorfa, se espera que tenga una conductividad térmica baja, debido a que las estructuras desordenadas, tienden a disipar fonones más fácilmente, los cuales son las vibraciones que se generan en la red de átomos de la estructura cristalina por el calor aplicado.^[71] Por otro lado, la microestructura que presentó la composición A, tiene un porcentaje de porosidad del 48%, por lo que se podría haber concluido que esta composición podría ser la indicada, ya que, al tener mayor porcentaje de porosidad, disminuye la densificación del material y también lo hace la conductividad térmica, por el contenido de aire que se queda atrapado en los poros.^[71] Más en el análisis de poros (**Figura 33**), se mostró que tenían algunos poros de gran tamaño con un porcentaje del 2.8% del total de poros (aprox. de 2 - 10 mm) lo que de acuerdo con *Østergaard M. y col.*^[66], cuando el poro del vidrio espuma tiende a tener un diámetro superior a 1 – 5 mm, la conductividad térmica aumenta, debido a la convección que se da entre los poros de mayor tamaño, lo que afecta en la transferencia de calor ya que el

calor se concentra en estos poros evitando que se difunda de manera correcta y rápidamente, por lo que el VES presenta un valor mayor de conductividad.

En el caso de la composición C, presentó una conductividad térmica promedio de $0.116 \text{ W/m}^*\text{K}$, siendo la más alta entre las tres composiciones prometedoras. Sin embargo, sucedió algo similar que en la composición A, ya que el porcentaje de porosidad que presentaba era del 39% pero se tenían poros de tamaño mayor en un porcentaje del 2.7%, como los mencionados en literatura, por consecuencia sucedió el mismo fenómeno con la transferencia de calor a lo largo del material.

Sin embargo, para la composición B, la microestructura fue diferente. El VES de esta composición presentó una porosidad del 37% con un diámetro de poro promedio del 0.049 cm, además, se tuvo un porcentaje del total de poros de 2 – 10 mm de 1.7%, el cual es menor a las otras composiciones, lo que evita que se produzca convección entre poros de gran tamaño y el material logre difundir el calor rápidamente. También, las estructuras cristalinas que tiene este VES son complejas y desordenadas, otro factor importante para que la conductividad térmica resultara en un valor menor a las demás composiciones, ya que los cerámicos con mayor cantidad de estructuras complejas y materiales desordenados, tienden a disipar los fonones más fácilmente, y como resultado tienen conductividades térmicas bajas.^[71]

5.5.5. Análisis mecánico, RC.

El vidrio espuma comercial tiene una resistencia a la compresión baja de 0.62 MPa [72], esta permite conocer el soporte a las cargas que se tienen previstas para que los materiales aislantes, como el vidrio espuma, puedan ser aplicados en el ramo deseado.[56, 73]

El tipo de muestra, de acuerdo con la clasificación marcada en la norma, el vidrio espuma fue en “ladrillo aislante” con una densidad aparente de 1.60 g/cm³ o más del 45% de porosidad total presente en el material.

Los resultados de resistencia a la compresión de las composiciones prometedoras, se presentan en la **Figura 38**.

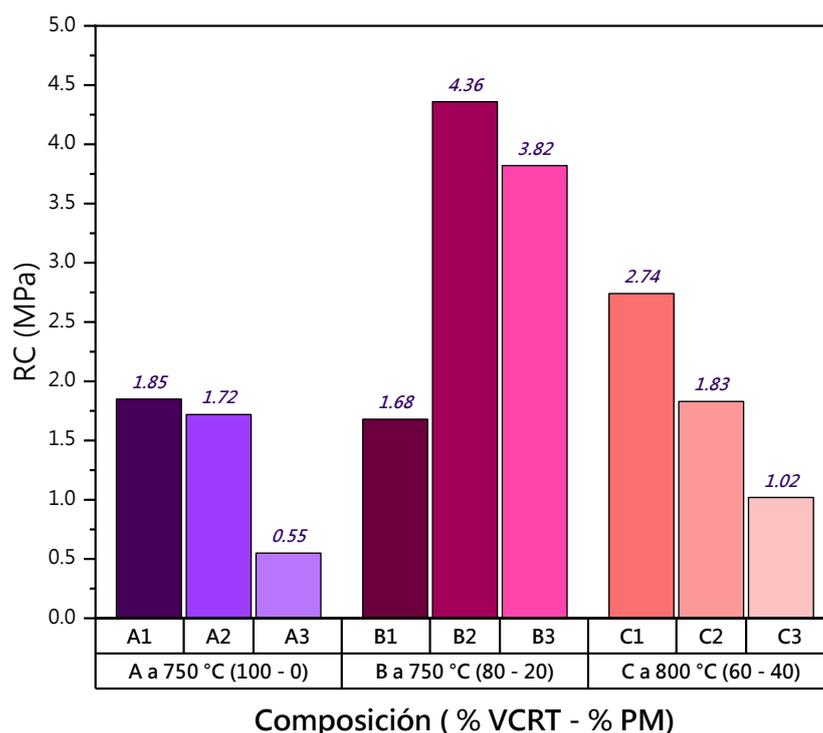


Figura 38. Resistencia a la compresión de las composiciones A, B a 750 °C y C a 800 °C.

Se puede observar que la composición con mayor resistencia a la compresión fue la composición B con un promedio de 3.48 MPa, el cual es un

valor mayor al que presenta un vidrio espuma comercial. Esto se debe a la relación de la resistencia a la compresión con la microestructura que presentan los VES, la cual se puede explicar por medio de la Ley de Griffith:

$$\sigma = \gamma_F \frac{K_{1C}}{d^{\frac{1}{2}}} \quad [7]$$

Donde:

σ = Fuerza de tensión

γ_F = Constante determinada por el tamaño del defecto y geometría del espécimen

K_{1C} = Factor crítico de la intensidad del estrés/tensión

d = Tamaño del grano

De acuerdo con lo marcado en la ley de Griffith, los cerámicos con una distribución uniforme de poros pequeños tendrán un alto γ_F , por lo que son más rígidos, fuertes y resistentes que aquellos con poro agregados, es decir, defectos críticos de gran tamaño, esto manejando un mismo nivel de porosidad. La forma del poro también es importante, cuando más grande es que el tamaño del grano, afecta a la resistencia, este fue el fenómeno sucedido con las composiciones A y C, donde la porosidad no era uniforme y se tenía un tamaño de poro de 0.058 y 0.057 cm cuando el tamaño de grano se encuentra mayor a 0.0074 cm, este es un número aproximado que se obtuvo por el tamiz malla 200 que se usó, respectivamente. Otro punto a favor de la uniformidad de la porosidad en la composición B es que esta tenía en su mayoría poros esféricos (**Figura 39**), los que causan una menor concentración de tensión y por consecuencia, evita el fallo del material.^[71] Así como, que esta composición, de acuerdo con el análisis de distribución normal realizado,

se comporta de manera similar a una distribución normal, confirmando que los poros presentes se mantienen en un mismo rango de diámetro.

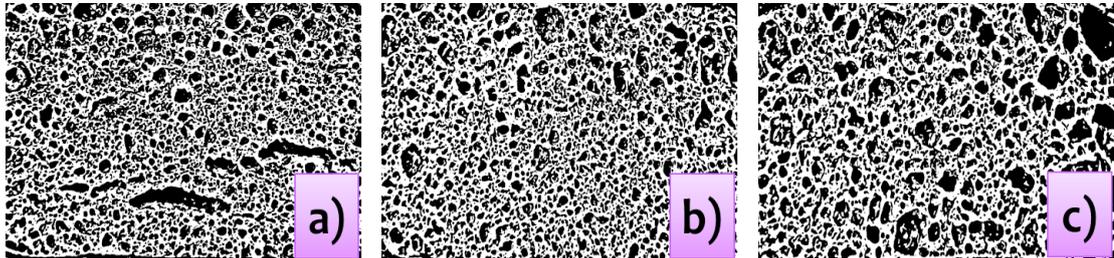


Figura 39. Mapeo de poros en cada composición. a) Composición a A 750 °C, b) Composición B 750 °C y c) Composición C 800 °C.

Basados en los resultados obtenidos, se puede decir que la composición adecuada para tener una buena resistencia a la compresión y que es un valor por arriba del que actualmente se comercializa, es la composición B a 750 °C, la cual superó en 2.86 MPa la de un vidrio espuma comercial.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

En el presente proyecto, se logró demostrar la viabilidad del uso de desecho de vidrio de tubos catódicos, perlita mineral y cáscara de huevo para la elaboración de un vidrio espuma sustentable, que fuera una competencia para los productos comerciales. Además, se benefició a la vida útil de cada una de las materias primas usadas dándoles un nuevo valor agregado y evitando la extracción de materia virgen para su elaboración.

Así mismo que la sustitución de la materia prima por residuos industriales y sólidos urbanos permitiría eliminar el uso de materia virgen, así como disminuir la extracción de esta, lo que redundó en dar una nueva alternativa de sinterización para el vidrio espuma.

Por medio de DRX y FRX, se encontró que el vidrio de CRT y la perlita mineral propuestas contienen un alto porcentaje de SiO_2 y Al_2O_3 , confirmando que son una alternativa favorable para la elaboración de vidrio espuma, ya que el vidrio espuma comercial es fabricado a partir de estos componentes. Asimismo, por estas técnicas, se confirmó que la cáscara de huevo es un 98% CaCO_3 , siendo una gran alternativa para ser usado como un “reactivo” y ayudar al ciclo de vida que tiene este residuo. Y, de esta manera, también se

logró aportar al Objetivo 12 del Desarrollo Sostenible de Producción y consumo responsable, que habla de un consumo y una producción sostenible que consistan en hacer más y mejor con menos, esto con la finalidad de evitar el crecimiento económico a partir de la degradación medioambiental, aumentar la eficiencia de recursos y promover un estilo de vida sostenible.

El manejo de la cáscara de huevo como carbonato debe ser usado a partir de una temperatura de sinterización mayor a los 663 °C, debido a que como se mostró en el Análisis de DTA/TG, este residuo comienza a descomponerse a partir de esta temperatura. Además, en ser el caso donde se prefiera o requiera que el material no presente carbonatos en sus fases cristalinas, es recomendable usar la cáscara de huevo a temperaturas mayores a los 815 °C, esto para que se lleve a cabo su completa descomposición.

El uso del dióxido de manganeso (MnO_2) en un 2 %p, presentó rangos de tamaño de poro menores a 0.76 μm , indicando que la pieza contenía una porosidad de menor tamaño, reduciendo la problemática de que el poro se llegara a comportar como una grieta y por consecuencia, reducir la resistencia a la compresión. Con esto se demostró que el MnO_2 cumple con la función de mantener homogeneizado el tamaño de poro en el VES. Además, se obtuvo un mayor porcentaje de porosidad, lo que beneficiaría a disminuir la conductividad térmica.

La prueba de absorción de agua demostró que el VES a 750 °C con una composición de 80 %p de VCRT y 20 %p de PM tuvo una densidad aparente del 0.69 g/cm^3 , la cual es muy similar a la marcada en literatura, por lo que esta presentaría una conductividad térmica baja. También, el VES obtuvo una

porosidad del 37 % con un diámetro de poro promedio de 0.049 cm, lo cual beneficiaría a la conductividad térmica resultando un valor bajo y en la resistencia a la compresión aumentando su soporte.

La microestructura que presentó el VES a 750 °C tiene diámetro de poro de 0.049 cm con un porcentaje del 96.41% de poros menores a 0.20 cm y un porcentaje menor a las demás composiciones de 0.02% de poros menores o iguales a 0.9 cm, esto benefició a la conductividad térmica evitando la convección entre poros y a la resistencia a la compresión ya que no se tuvieron poros de 1 cm o más que se pudieran comportar como grietas debido a la no uniformidad a la hora de aplicar una fuerza sobre estos. Los resultados obtenidos para cada propiedad fueron de 0.085 W/m*K y 3.48 MPa, respectivamente.

De igual manera, se logró encontrar la microestructura que favorece a las propiedades deseadas como una baja conductividad térmica (0.085 W/m*K) y manteniendo un alto valor de resistencia a la compresión (3.48 MPa). Al elaborar los vidrios espuma a partir de estos residuos tienen una ventaja más, que al ser usados en el ramo de la construcción podrán mantener el confort de una edificación y así, reducir el alto consumo energético que es resultado del uso excesivo de los sistemas de aire acondicionado y calefacción por las temperaturas extremas que actualmente presenta el planeta.

CAPÍTULO 7

7. PROSPECTIVA FUTURA

En el presente proyecto no se consideró el uso de distintos agentes espumadores, lo cual es un activo principal en la fabricación del vidrio espuma. Sin embargo, es un punto muy importante que considerar, por lo que se propone que, en trabajos futuros, se prueben algunos de ellos como distintos carbonatos u óxidos, basándose en este estudio. Esto ayudaría al desarrollo futuro del material, debido a que los agentes espumantes tienen distintos mecanismos de descomposición y algunos son mejor controlados con base en la temperatura de sinterización, lo cual ayudaría a tener una distribución de poro normal, mejorando así la resistencia a la compresión.

El estudio también mostró que la distribución de poro no arrojó una distribución normal. Por otro lado, se ha visto que se puede utilizar prensado para mantener un control en la porosidad generada en el vidrio espuma, lo cual sería una gran área de oportunidad para aplicarse utilizando estas materias primas, con el fin de brindar una distribución normal al material y aportar positivamente al control del poro, evitando grietas y poros de gran tamaño.

Por último, se recomienda hacer un análisis riguroso de sustentabilidad, un análisis económico y uno de viabilidad para la fabricación del vidrio espuma



con e-waste, perlita mineral y cáscara de huevo a nivel industrial, esto podría realizarse con un análisis de ciclo de vida o alguna metodología que trabaje estos 3 análisis en conjunto.

CAPÍTULO 8

8. REFERENCIAS

1. Pérez Cruz JA, Reding Domínguez JG, Tass Herrera B, Morales Turrubiates EE, Carbonell Pérez RG (2018) La e-waste en México: otro problema para el medio ambiente del país. RECI Rev Iberoam las Ciencias Comput e Informática 7:124–139 .
<https://doi.org/10.23913/reci.v7i13.82>
2. Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann P (2017) Residuos electrónicos 2017 Cantidades , Flujos , y Recursos
3. Senado de la República.
https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_comision_permanente/documento/98295. Consultado el 26 abr 2021
4. Qi Y, Xiao X, Lu Y, Shu J, Wang J, Chen M (2019) Cathode ray tubes glass recycling: A review. Sci Total Environ 650:2842–2849 .
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.383>
5. Naturales S de MA y R Residuos Sólidos Urbanos (RSU).
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>. Consultado el 26 abr 2021
6. Kramar D, Bindiganavile V (2013) Impact response of lightweight

- mortars containing expanded perlite. *Cem Concr Compos* 37:205–214 .
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.004>
7. Rashad AM (2016) A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer. *Constr Build Mater* 121:338–353 .
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001>
 8. Singh M, Garg M (1991) Perlite-based building materials - a review of current applications. *Constr Build Mater* 5:75–81 .
[https://doi.org/10.1016/0950-0618\(91\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(91)90004-5)
 9. Celik AG, Kilic AM, Cakal GO (2013) Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material. *Physicochem Probl Miner Process* 49:689–700 .
<https://doi.org/10.5277/ppmp130227>
 10. Subsecretaria de Minería (2011) Panorama Minero del estado de Chihuahua
 11. Subsecretaria de Minería (2019) Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2018.
 12. SENER (2010) Información Estadística (statistical information).
 13. Palomo M (2017) Aislantes térmicos: Criterios de Selección por Requisitos Energéticos. E.T.S. Arquitectura (UPM)
 14. DA DB-HE / 1 (2020) DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente Referencias. 1–26
 15. Ratsa Características de los aislamientos térmicos.
<https://www.ratsa.mx/biblioteca/post/blog/801->

Los aislamientos térmicos en la industria

16. Asociación Española para Calidad (2019) ARQUITECTURA SOSTENIBLE. <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/arquitectura-sostenible>
17. Yunus, A., Çengel; Ghajar AJ (2011) Transferencia de Calor y Masa, 3a. Edició. McGraw Hill
18. Kern L (1933) EUA Patente 1, 898, 839
19. Kitaigorodskii, I.I., Butt, L.M., Gaisinski VL et al. (1959) The choice of an efficient design for a foam glass manufacturing plant. *Glas Ceram* 6:301 . <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00687175>
20. Long B (1934) EUA Patente 1, 945, 052.
21. Lytle WO (1940) EUA Patente 2, 215, 223.
22. Powell ER (1964) EUA Patente 3, 133, 820.
23. Miga AEW (1975) EUA Patente. 22
24. König J, Petersen RR, Yue Y (2015) Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. *Ceram Int* 41:9793–9800 . <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.051>
25. Bernardo E, Albertini F (2006) Glass foams from dismantled cathode ray tubes. *Ceram Int* 32:603–608 . <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.04.019>
26. Yao Z, Ling TC, Sarker PK, Su W, Liu J, Wu W, Tang J (2018) Recycling difficult-to-treat e-waste cathode-ray-tube glass as construction and

- building materials: A critical review. *Renew Sustain Energy Rev* 81:595–604 . <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.027>
27. Scarinci G, Brusatin G, Bernardo E (2006) Glass Foams. *Cell Ceram Struct Manuf Prop Appl* 158–176 . <https://doi.org/10.1002/3527606696.ch2g>
28. The Definitive Foam Glass Guide | Glavel | Foam Glass Aggregate. https://www.glavel.com/definitive_foam_glass_aggregate_guide/. Consultado el 2 mar 2021
29. Insulation Materials: Cellular Glass - Insulation Outlook Magazine. <https://insulation.org/io/articles/insulation-materials-cellular-glass/>. Consultado el 2 mar 2021
30. Fedorov AG, Pilon L (2002) Glass foams: Formation, transport properties, and heat, mass, and radiation transfer. *J Non Cryst Solids* 311:154–173 . [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01376-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01376-5)
31. Bernardo E, Cedro R, Florean M, Hreglich S (2007) Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. *Ceram Int* 33:963–968 . <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.02.010>
32. Guo Y, Zhang Y, Huang H, Meng X, Liu Y, Tu S, Li B (2016) Novel glass ceramic foams materials based on polishing porcelain waste using the carbon ash waste as foaming agent. *Constr Build Mater* 125:1093–1100 . <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.134>
33. Yin H, Ma M, Bai J, Li Y, Zhang S, Wang F (2016) Fabrication of foam glass from iron tailings. *Mater Lett* 185:511–513 .

- <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.034>
34. Zhu M, Ji R, Li Z, Wang H, Liu LL, Zhang Z (2016) Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Constr Build Mater* 112:398–405 .
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183>
 35. Østergaard MB, Petersen RR, König J, Yue Y (2018) Effect of alkali phosphate content on foaming of CRT panel glass using Mn₃O₄ and carbon as foaming agents. *J Non Cryst Solids* 482:217–222 .
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.12.041>
 36. Østergaard MB, Petersen RR, König J, Johra H, Yue Y (2017) Influence of foaming agents on solid thermal conductivity of foam glasses prepared from CRT panel glass. *J Non Cryst Solids* 465:59–64 .
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.03.035>
 37. Souza MT, Maia BGO, Teixeira LB, de Oliveira KG, Teixeira AHB, Novaes de Oliveira AP (2017) Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes. *Process Saf Environ Prot* 111:60–64 .
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.06.011>
 38. Xi C, Zheng F, Xu J, Yang W, Peng Y, Li Y, Li P, Zhen Q, Bashir S, Liu JL (2018) Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials. *Constr Build Mater* 190:896–909 . <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170>
 39. da Silva RC, Kubaski ET, Tebcherani SM (2018) Glass foams produced by glass waste, sodium hydroxide, and borax with several pore structures using factorial designs. *Int J Appl Ceram Technol* 17:75–83 .

- <https://doi.org/10.1111/ijac.13210>
40. Wang H, Chen Z, Ji R, Liu L, Wang X (2018) Integrated utilization of high alumina fly ash for synthesis of foam glass ceramic. *Ceram Int* 44:13681–13688 . <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.207>
 41. da Silva Fernandes FA, Arcaro S, Tochtrop Junior EF, Valdés Serra JC, Bergmann CP (2019) Glass foams produced from soda-lime glass waste and rice husk ash applied as partial substitutes for concrete aggregates. *Process Saf Environ Prot* 128:77–84 . <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.044>
 42. Chen Z, Wang H, Ji R, Liu L, Cheeseman C, Wang X (2019) Reuse of mineral wool waste and recycled glass in ceramic foams. *Ceram Int* 45:15057–15064 . <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.242>
 43. Ji R, Zheng Y, Zou Z, Chen Z, Wei S, Jin X, Zhang M (2019) Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. *Constr Build Mater* 215:623–632 . <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226>
 44. Hamza A, Kocserha I (2020) The effect of expanded perlite on fired clay bricks. *J Phys Conf Ser* 1527: . <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1527/1/012032>
 45. Zukowski M, Haese G (2010) Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation. *Energy Build* 42:1402–1408 . <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.009>
 46. Topçu IB, Işıkdağ B (2006) Manufacture of high heat conductivity

- resistant clay bricks containing perlite. *Build Environ* 42:3540–3546 .
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.016>
47. Sengul O, Azizi S, Karaosmanoglu F, Tasdemir MA (2011) Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy Build* 43:671–676 .
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
48. Vaou V, Papias D (2010) Thermal insulating foamy geopolymers from perlite. *Miner Eng* 23:1146–1151 .
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.015>
49. Gao H, Liu H, Liao L, Mei L, Lv G, Liang L, Zhu G, Wang Z, Huang D (2019) Improvement of performance of foam perlite thermal insulation material by the design of a triple-hierarchical porous structure. *Energy Build* 200:21–30 . <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.010>
50. Davraz M, Koru M, Akdağ AE, Kılınçarslan, Delikanlı YE, Çabuk M (2020) Investigating the use of raw perlite to produce monolithic thermal insulation material. *Constr Build Mater* 263: .
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120674>
51. Vicerrectorado de Investigación; Universidad de Sevilla FUNDAMENTO TEÓRICO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X
52. Universidad de Alicante. (2018) ESPECTROSCOPÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X. Servicios Técnicos de Investigación. <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>. Consultado el 30 mar 2021



53. Brown ME (1988) Introduction to thermal analysis: Techniques and Applications, 1a ed. Chapman and Hill, New York
54. ASTM (1999) ASTM C373-14: Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. ASTM C373-88 88:1–2
55. ASTM E1530-11 (2011) ASTM E1530-11 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. i:1–9 .
<https://doi.org/10.1520/E1530-11.2>
56. ASTM C133 (2014) Standard test methods for cold crushing strength and modulus of rupture of refractories. Annu B ASTM Stand 97:1–6
57. Guenanou F, Khelafi H, Aattache A (2019) Behavior of perlite-based mortars on physicochemical characteristics, mechanical and carbonation: Case of perlite of Hammam Boughrara. J Build Eng 24:100734 . <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100734>
58. Méar F, Yot P, Cambon M, Ribes M (2006) The characterization of waste cathode-ray tube glass. Waste Manag 26:1468–1476 .
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.017>
59. Chen B, Wang K, Chen X, Lu A (2012) Study of foam glass with high content of fly ash using calcium carbonate as foaming agent. Mater Lett 79:263–265 . <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.052>
60. Petersen RR (2015) Foam Glass for Construction Materials: Foaming Mechanism and Thermal Conductivity. Universidad Aalborg

61. FOAMGLAS® TAPERED T3+. <https://www.foamglas.com/es-es/productos/fgbt3tapered>. Consultado el 8 abr 2021
62. (2011) Heat-insulating Materials and Sound-absorbing Materials. *Build Mater Civ Eng* 316–423 . <https://doi.org/10.1533/9781845699567.316>
63. Maiti, Bidinger (1981) *Ceramic Materials Science and Engineering*
64. Consumo y producción sostenibles – Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>. Consultado el 28 abr 2021
65. Méar F, Yot P, Viennois R, Ribes M (2007) Mechanical behaviour and thermal and electrical properties of foam glass. *Ceram Int* 33:543–550 . <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.11.002>
66. Østergaard MB, Cai B, Petersen RR, König J, Lee PD, Yue Y (2019) Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams. *Mater Lett* 250:72–74 . <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.106>
67. Toledo Quiñones R (2011) *Prueba de Normalidad*. 10
68. Salm M (2014) *Minitab Prueba de Normalidad*
69. Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S.; Incropera FP (2011) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons
70. Mi H, Yang J, Su Z, Wang T, Li Z, Huo W, Qu Y (2017) Preparation of ultra-light ceramic foams from waste glass and fly ash. *Adv Appl Ceram* 116:400–408 . <https://doi.org/10.1080/17436753.2017.1342394>
71. Lee, William E.; Rainforth WM (1994) *Ceramic Microstructures: Property*



control by processing, 1a. Edició. Springer Netherlands

72. Bian J, Cao W, Yang L, Xiong C (2018) Experimental research on the mechanical properties of tailing microcrystalline foam glass. *Materials (Basel)* 11:1–19 . <https://doi.org/10.3390/ma11102048>
73. Specifying FOAMGLAS® insulation for load-bearing applications. <https://www.foamglas.com/en/advice-center/protection-areas/pressure>. Consultado el 27 abr 2021