

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO
OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR
VIDRIO DE DESCHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE
CARBONO**

Por

BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO.

**Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS
con Orientación en Materiales de Construcción.**

Enero, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO
OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR
VIDRIO DE DESECHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE
CARBONO**

Por

BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO.

**Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS
con Orientación en Materiales de Construcción.**

Enero, 2026

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO
OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR
VIDRIO DE DESCHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE
CARBONO**

Aprobación de la Tesis

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres
Directora de Tesis

M.C. Xiomara Lisette García Montelongo
Codirectora de Tesis

Dr. Cesar Augusto Laguna Torres
Vocal

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Resumen

Blanca Anakaren Castro Botello.

Fecha de Graduación: Enero, 2026

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Civil.

Título de la tesis:

Comportamiento mecánico de un mortero ecológico obtenido mediante la sustitución parcial de cemento por vidrio de desecho y nanoreforzado con sílice/nanotubos de carbono

Número de páginas: 121

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

Área de estudio: Materiales de Construcción.

Propósito de la tesis.

El propósito de este trabajo de tesis fue desarrollar un mortero utilizando un material alternativo para la sustitución del cemento Portland. Para ello, se empleó un vidrio de desecho de naturaleza sódico-cálcica, con el objetivo de aprovechar su potencial como solución alcalina. Esta solución permitirá, posteriormente, la adecuada incorporación y disolución de un nanorefuerzo compuesto de dióxido de silicio y nanotubos de carbono, con el fin de elaborar morteros y analizar sus propiedades mecánicas y microestructurales, comparándolas con las de un mortero convencional. Esta investigación busca darle un nuevo uso a un material de desecho con características químicas similares al cemento Portland, proponiendo así una alternativa que contribuya a reducir la contaminación generada por ambos materiales. Para lograrlo, se evaluaron diferentes dosificaciones de sustitución, analizando tanto sus resistencias mecánicas como sus características microestructurales mediante diversas técnicas de caracterización, tales como XRD, XRF, SEM, ICP, FTIR, pruebas de fluidez, calorimetría y el método R³ con el fin de determinar la dosificación óptima que presente un mejor desempeño mecánico.

Contribuciones y Conclusiones.

La incorporación del nanorefuerzo y la activación mecánica del vidrio mejoran la densidad de la matriz, la formación de geles CSH y las resistencias a compresión y flexión, sin superar los límites de expansión. Los morteros con vidrio activado mecánicamente demuestran hasta 27% de incremento en resistencias a edades prolongadas, evidenciando su potencial para morteros sostenibles.

FIRMA DEL ASESOR:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad, fortaleza y salud para poder realizar esta investigación. Por ser mi guía constante en cada paso de este camino y darme la fe y paciencia cuando más la necesité.

Agradezco a mi familia, a mis padres Samuel Castro y Juana María Botello, quienes trabajaron incansablemente para apoyarme y darme todas las oportunidades necesarias para llegar hasta este punto en mi vida y a mi hermano, Samuel Castro, quien siempre me apoya. Darles las gracias por siempre brindarme su amor y apoyo, por apoyarme a creer en mí y por confiar en que podría terminar con esta investigación.

Agradecer a mis abuelos por su gran apoyo incondicional durante mis estudios y por ser un pilar fundamental en toda mi vida. Por mostrarme que todo es posible mientras lo intentemos y no se deje a medias.

Darle las gracias a mis compañeros y amigos, quienes nunca dudaron de que podría defender mi trabajo y que podría salir adelante. A Andrea Reyes, quien estuvo para mí desde el primer momento que pensé en estudiar una maestría y nunca dejó de creer que podría contra cualquier dificultad. A Anamary, quien siempre estuvo apoyándome, incluso estando en otra parte del mundo, gracias por siempre creer en mí y hacerme reír cuando pensaba que todo iría mal.

Agradezco a Samuel Mares y Diego Minaya, mis compañeros de generación, quienes me apoyaron desde las primeras semanas y me brindaron su amistad a lo largo de estos dos años de maestría. Por brindarme apoyo cuando no conocía sobre alguna prueba, por hacerme reír día a día y por motivarme a seguir adelante con el trabajo de tesis.

Agradecer a mis compañeros del Cuerpo Académico de Materiales Alternativos para Ingeniería (CAMAII) por siempre ayudarme y darme ánimos al momento de realizar mis seminarios, por estar ahí y hacerme reír y superar cualquier mal momento. A Miguel Pérez, Diego Mendoza y Mario Torres, por su apoyo y guía cuando no comprendía algún procedimiento; gracias por no dudar en ayudarme y creer en mí.

A su vez, agradecer a mi directora de tesis, la Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres, y codirectora, la M.C. Xiomara Lisette García Montelongo, quienes me brindaron su

experiencia, comprensión y guía constante a lo largo del trabajo de maestría. Por confiar en mí y alentarme a seguir con mis estudios y por darme esa confianza para concluir esta investigación, sin su ayuda no habría podido llegar a este punto. De igual manera, al Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío por su comprensión y apoyo a lo largo de este trabajo de tesis.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como a la Facultad de Ingeniería Civil, al posgrado y al Cuerpo Académico de Materiales Alternativos para Ingeniería por brindarme los conocimientos y herramientas necesarias para la realización de este trabajo de investigación.

Agradecer al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción del IIC, a Q.F.B. Silvia López, por haberme facilitado el espacio, tiempo y los equipos a lo largo de la investigación para la realización de pruebas y análisis de resultados, por su atención y su paciencia. De igual manera, al Departamento de Tecnología del Concreto por el uso de las instalaciones y equipos.

Agradecer a la empresa CRISA Libbey México por proporcionar el material necesario para la elaboración y a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico para la realización del presente trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi refugio en los momentos difíciles y mi impulso constante para seguir adelante. A mis padres, Samuel y Juana Maria, por su amor incondicional y su confianza en mí, incluso cuando dudaba de si podría lograrlo. A mis abuelos por confiar en que podría lograr todo lo que me propusiera. A mi abuela, Juana Maria, quien ya no está, pero quien no dudo me apoyaría en cada paso dado.

A mi hermano, Samuel, quien nunca dejó de confiar en mí y siempre lograba sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Justificación del estudio.....	5
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	7
2.1. La industria constructiva y el Cemento Portland	7
2.1.1. Composición del Cemento Portland. ¡Error! Marcador no definido.	8
2.1.2. Fabricación del Cemento Portland y su Impacto Ambiental.....	8
2.1.3. Proceso de hidratación.....	10
2.2. El vidrio: clasificación y su potencial como material sustituto.....	12
2.2.1. Clasificación de los vidrios.	12
2.2.1.1. Vidrio sódico cálcico.....	13
2.2.1.2. Vidrio de plomo.....	14
2.2.1.3. Vidrio de borosilicato.....	14
2.2.1.4. Vidrio de sílice.	14
2.2.2. El vidrio como sustituto del Cemento Portland.	15
2.2.2.1. Materiales activados alcalinamente.	15
2.2.2.2. Uso del vidrio como sustituto del cemento con y sin activadores.	16
2.3. Nanociencia y nanotecnología en la construcción.	20
2.3.1. Nano sílice.....	20
2.3.2. Nanotubos de carbono.	23
2.3.3. Nanocomuestos.....	25
2.3.3.1. Métodos de fase gaseosa.....	25
2.3.3.2. Métodos en fase líquida o coloidal.	26
2.4. Hipótesis.	28
2.5. Objetivos.....	28
2.5.1. Objetivo general.	28
2.5.2. Objetivos específicos.....	28
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	30
3.1. Materiales de partida.....	32
3.2. Desarrollo experimental.....	33
3.2.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.	34
3.2.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.	35

3.2.3. Etapa 3. Efecto del tiempo de agitación en propiedades mecánicas.....	36
3.2.4. Etapa 4. Morteros con sustituciones mayores: 30, 40 y 50%.....	38
3.2.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerzo de SiO ₂ /NTC en morteros con diferentes porcentajes de sustitución.....	39
3.3. Técnicas de caracterización, pruebas y equipos.....	40
3.3.1. Técnicas de caracterización	41
3.3.2. Otras pruebas	44
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	47
4.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.	47
4.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.....	51
4.3. Etapa 3. Morteros con 20% de sustitución.....	57
4.4. Etapa 4. Morteros con sustituciones mayores: 30, 40 y 50%.	64
4.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerzo de SiO₂/NTC en morteros con diferentes porcentajes de sustitución.....	84
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
5.1. Conclusiones.	97
5.2. Recomendaciones.	99
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	100

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla I. Tipos de vidrio.....	13
Tabla II. Diseño experimental.....	32
Tabla III. Composición química del cemento Portland y el vidrio.	49

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Fabricación del Cemento Portland	9
Figura 2. Evolución del calor durante el proceso de hidratación del CP.....	10
Figura 3. Etapas experimentales de la investigación.	31
Figura 4. Metodología, etapa 1.	34
Figura 5. Metodología, etapa 2.	35
Figura 6. Metodología, etapa 3.	36
Figura 7. Pruebas mecánicas.	37
Figura 8. Metodología, etapa 4.	39
Figura 9. Metodología, etapa 5.	40
Figura 10. Análisis DTP de materias primas del vidrio y cemento.	48
Figura 11. Difractograma de rayos X del cemento Portland y el vidrio.....	50
Figura 12. SEM de las materias primas: a) CP y b) Vidrio	51
Figura 13. Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: ICP y pH del vidrio.	52
Figura 14. Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: FTIR.	54
Figura 15. Análisis DTP y SEM posterior a la activación mecánica del vidrio.....	55
Figura 16. Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: R ³	57
Figura 17. SEM de morteros, muestras con activación mecánica.....	58
Figura 18. Calorimetría de morteros con vidrio con activación mecánica a diferentes tiempos; Flujo de calor y Calor acumulado.	60
Figura 19. Resistencia a compresión de muestras con diferentes tiempos de activación.....	61
Figura 20. Resistencia a flexión de muestras con diferentes tiempos de activación.	63
Figura 21. XRD de muestra referencia a 7, 28, 90 y 180 días.....	65
Figura 22. XRD de muestra con 20% de sustitución referencia a 7, 28, 90 y 180 días.	66
Figura 23. XRD de muestras con 30% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días.....	66
Figura 24. XRD de muestras con 40% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días.....	66
Figura 25. XRD de muestras con 50% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días.....	67
Figura 26. FTIR de muestras VA y VP a 28 días.....	68
Figura 27. FTIR de muestras VA y VP a a) 90 y b) 180 días.	69
Figura 28. SEM de muestras con sustitución de vidrio a 28 días.	71
Figura 29. SEM de muestras con sustitución de vidrio a 90 días.	72
Figura 30. SEM de muestras con sustitución de vidrio a 180 días.....	73
Figura 31. Calorimetría de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VA; Flujo de calor y Calor acumulado.	75
Figura 32. Calorimetría de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VP; Flujo de calor y Calor acumulado.	76
Figura 33. Expansión de las muestras VA y VP a 14 días.....	78
Figura 34. Resistencia a compresión de muestras a) VA y b) VP.....	79
Figura 35. Resistencia a flexión de muestras a) VA y b) VP.	80
Figura 36. XRD de los nanomateriales y el nanorefuerzo.	84
Figura 37. SEM de materias primas; a) NTC, b) nSiO ₂ y c) Nanorefuerzo NTC/SiO ₂	85
Figura 38. Análisis DLS del agua con vidrio para dispersión del nanorefuerzo.	86
Figura 39. XRD de muestras diferentes porcentajes de sustitución y adición del nanorefuerzo a 7, 28, 90 y 180 días.....	88

Figura 40. FTIR de muestras VN a a) 28 días, b) 90 días y c) 180 días.....	89
Figura 41. SEM de muestras VN a 28 días.	90
Figura 42. SEM de muestras VN a 90 días.	91
Figura 43. SEM de muestras VN a 180 días.	91
Figura 44. Calorimetría de morteros N; a) Flujo de calor y Calor acumulado, b) Acercamiento Flujo de calor.....	93
Figura 45. Expansión de muestras VN a 14 días.....	94
Figura 46. Propiedades mecánicas, a) Compresión y b) Flexión.	95

NOMENCLATURAS

Símbolo	Descripción
C ₃ A	Aluminato tricálcico (Celita).
ANIPAC	Asociación Nacional de Industrias de Plástico.
IC	Calorimetría Isotérmica.
CaCO ₃	Carbonato de Calcio.
MgCO ₃	Carbonato de Magnesio.
CP	Cemento Portland.
CPC	Cemento Portland Compuesto.
XRD	Difracción de rayos X.
SiO ₂	Dióxido de silicio.
DLS	Dispersión de Luz Dinámica.
DTP	Dispersión del Tamaño de Partículas.
ICP	Espectrometría de Plasma con Acoplamiento Inductivo.
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por Transferencia de Fourier.
C ₄ AF	Ferrita de calcio (Ferrita).
XRF	Fluorescencia de rayos X.
OH-	Grupo Hidroxilo.
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Calcio.
NaOH	Hidróxido de Sodio.
MAA	Materiales Activados Alcalinamente.
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido.
nSiO ₂	Nano sílice.
NTC	Nanotubos de carbono.
CaO	Óxido de Calcio.
MgO	Óxido de Magnesio.
Na ₂ O	Óxido de Sodio.
PM ₁₀	Partículas de 10 µm o menores.
PM _{2.5}	Partículas de 2.5 µm o menores.
PIGECA	Plan Integral para la Gestión Estratégica de la Calidad del Aire en Nuevo León.
pH	Potencial de Hidrógeno.
RAS	Reacción álcali-sílice.
R ³	Reactividad del material puzolánico.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
CSH	Silicato de Calcio Hidratado.
Na ₂ SiO ₃	Silicato de Sodio.
C ₂ S	Silicato dicálcico (Belita).
C ₃ S	Silicato tricálcico (Alita).
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas de Materiales.
VA	Vidrio agregado.
VN	Vidrio agregado, con el proceso de activación mecánica y la adición del nanocompuesto.
VP	Vidrio agregado, con el proceso de activación mecánica.
VSC	Vidrio sódico cálcico.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

A nivel mundial, el sector de la construcción es una de las industrias más contaminantes de la actualidad, se estima que un 40% de la contaminación está ligada, directa o indirectamente, a las actividades constructivas. De acuerdo con un informe de la ONU, el sector constructivo consume un 40% de toda la energía, realiza hasta un 30% de la extracción de materias primas y el 25% de los residuos sólidos generados provienen de diversas actividades ligadas con la construcción. A su vez, la obtención del clinker, principal componente del cemento Portland (CP), contribuye entre el 5% y 8% de las emisiones globales del dióxido de carbono (CO₂) [1].

Uno de los enfoques más adecuados para reducir la huella de CO₂ producida por el sector constructivo es la sustitución de las materias primas utilizadas, en este caso el cemento, por recursos naturales (cenizas volcánicas o metacaolín), subproductos industriales (la ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice, etc.) o desechos de plásticos y vidrios [1]. El vidrio es un material reciclabl e disponible como residuo en altas cantidades, lo que permite abastecer la demanda de ser empleado como sustituto de materiales de construcción. Este residuo sólido, que presenta diversas características con impacto ambiental, sobresaliendo entre ellas el no ser biodegradable, por lo que permanece de forma permanente en los vertederos y la contaminación asociada a él se puede generalizar en el aire, agua y suelo. La solución propuesta en el presente trabajo es

el uso del vidrio sódico cálcico (VSC) en mezclas de concreto y morteros, debido a que este material presenta altos contenidos de calcio y sílice en su composición, siendo similares a los del CP y no interfiere con las fases del material cementante, las cuales son alita (C_3S), belita (C_2S), celita (C_3A) y ferrita (C_4AF) [2].

La principal contribución a las propiedades mecánicas de una matriz de un CP proviene del silicato de calcio hidratado (CSH) presente en tamaño nanométrico [3]. Debido a esta naturaleza, las nanopartículas con propiedades puzolánicas tendrán las mejores propiedades para modificar la matriz cementante al tener una escala de tamaño adecuada, por ejemplo, el añadir la nano sílice ($nSiO_2$) puede mejorar sus propiedades mecánicas, aparte de que la interacción de los nanotubos de carbono (NTC) dentro de una matriz cementante es a través del gel CSH lo cual genera un efecto de puente que mejorará la distribución de las cargas de tracción y sus resistencias a compresión y flexión [3].

En el presente trabajo, se llevará a cabo una investigación detallada sobre la sustitución del CP por un VSC, un material que se ha seleccionado por sus potenciales beneficios en la formulación del mortero, para determinar su posible uso como material cementante suplementario. Posteriormente, se adicionará un nanorefuerzo compuesto de SiO_2/NTC con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del mortero, tales como su resistencia a compresión y flexión. Además de estos objetivos principales, se realizará un análisis exhaustivo de la microestructura resultante, evaluando cómo se verá alterada la disposición interna y el comportamiento del mortero a nivel microscópico por la integración de los nanomateriales. De esta forma, se busca comprender en profundidad los diversos cambios en la composición del mortero los cuales puedan influir en su

rendimiento y durabilidad, con la intención de optimizar su aplicación en el ámbito constructivo y, a su vez, disminuir el impacto ambiental de este sector.

1.1. Planteamiento del problema.

El CP es el material más importante dentro de la construcción, es el más utilizado por sus componentes abundantes y económicos, siendo estos la caliza, arcilla y yeso [4]. En 2022, las emisiones de CO₂ procedentes de la industria de la construcción representaron el 37% a nivel mundial, superando las 10 gigatoneladas. Únicamente, en México, las emisiones de CO₂ aumentaron en 2023 un 4.54% respecto a 2022, convirtiéndose en uno de los países más contaminantes [5].

Por otro lado, los residuos sólidos son uno de los problemas ambientales más preocupantes por su rápido aumento y gestión; según la Asociación Nacional de Industrias de Plástico (ANIPAC), en 2019 se producían aproximadamente 14.9 millones de toneladas de residuos reutilizables donde un 39% corresponde a papel y cartón, un 30.7% a plásticos y un 16.6% a vidrio. Considerando estos valores, es importante mencionar que el reciclaje únicamente se realiza para el 56, 50 y 12%, respectivamente, lo que coloca estos residuos en igualdad de cantidad de materiales no aprovechados [6].

Asimismo, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) promedia un valor diario de residuos sólidos urbanos recolectados por entidad federativa en México, determinando que en Nuevo León se recolectaron 5,156.3 T de residuos para el año 2020, de las cuales, específicamente, la Zona Metropolitana de Monterrey contribuyó con 1,000 T [7].

Adicional a esto, según el Plan Integral para la Gestión Estratégica de la Calidad del Aire en Nuevo León (PIGECA), para el análisis de los datos de los establecimientos industriales por sector, para partículas menores o iguales a 10 μm (PM₁₀) y partículas menores o iguales a 2.5 μm (PM_{2.5}), se determinó que las fuentes emisoras relevantes para este tipo de partículas contaminantes son los sectores: automotriz, vidrio, química, cemento y cal. Más específicamente, para el año 2023, la industria del cemento y la cal generaron 224.5 T de PM₁₀ y 140.4 T de PM_{2.5} mientras que la industria del vidrio generó 285.3 T de PM₁₀ y 195 T de PM_{2.5} al año [8].

Tomando a consideración lo mencionado, se observa cómo en todo el mundo se producen millones de toneladas de residuos, más específicamente, se genera una alta cantidad de residuos de vidrio de los cuales solo se recicla una pequeña cantidad. Debido a esto, es que en los últimos años se han comenzado a realizar diversos estudios donde se utiliza el vidrio como un material reciclado dentro de la construcción, siendo considerado como sustituto del agregado y del CP. En estas investigaciones se ha logrado incorporar con éxito el vidrio como sustituto parcial del CP, mostrando cómo es que éste mejora o mantiene un comportamiento similar a un mortero convencional cuando el vidrio se muele y se incorpora en tamaños de partículas menores a 75 μm [1]. Sin embargo, es relevante mencionar que estos resultados se logran al agregar activadores a la mezcla, tales como hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos los cuales terminan siendo perjudiciales para el medio ambiente, como hidróxido [9].

Es de esta forma que, aunque se haya investigado el uso del vidrio como sustituto del CP, aún no se han logrado obtener los resultados esperados. Si bien se han llegado a utilizar varios tipos de porcentajes de sustitución, se ha observado que, mientras más vidrio se ha

añadido, las propiedades disminuyen. Por esta razón, en el presente proyecto se busca determinar cómo es que este sistema será favorecido por la adición de un nanomaterial, en este caso, un nanorefuerzo de SiO₂/NTC. De esta forma, la solución propuesta es el desarrollo de un mortero con sustitución parcial del CP por VSC con activación mecánica y la adición de un nanorefuerzo de SiO₂/NTC.

1.2. Justificación del estudio.

La agenda 2030 impulsa acciones orientadas a reducir el impacto ambiental y fomentar un uso responsable de los recursos lo que plantea retos importantes para diversos sectores, como la construcción [10]. Dentro de este contexto, la construcción sostenible toma gran importancia y tiene uno de los retos más complejos: la producción de materiales con un menor impacto ambiental y un bajo consumo energético.

Dentro de este marco entran los diversos estudios que se han realizado con el paso de los años para la utilización del vidrio de desecho como un material reciclable y un sustituto parcial de CP junto con la adición de diversos nanomateriales. Sin embargo, estos estudios han sido de forma individual, de forma que, la investigación de las variables (vidrio y nanorefuerzo) todavía es un área en desarrollo. Considerando lo anterior, es que en el presente trabajo se pretende desarrollar un procedimiento para la preparación de un mortero donde se incluya una activación mecánica al vidrio que permita la unión de este material a una matriz cementante, para su posterior adición de un nanorefuerzo de SiO₂/NTC.

El primer objetivo de esta metodología consiste en generar un aporte significativo a la sociedad mediante la reutilización de materiales que actualmente representan una fuente

considerable de contaminación ambiental, con el fin de fortalecer las prácticas sostenibles dentro del sector.

Como segundo objetivo se busca establecer una base metodológica que permita impulsar las investigaciones futuras que sean orientadas a la incorporación de un nanorefuerzo como adición y la evaluación de materiales alternativos que puedan actuar como sustitutos parciales del CP, ampliando este campo de estudio.

Finalmente, el tercer objetivo se enfoca en buscar el desarrollo de un producto aplicable a la industria, particularmente en sistemas de revestimiento, acabados o paneles prefabricados, con el propósito de ofrecer soluciones constructivas eficientes, duraderas y ambientalmente responsables.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.

2.1. Características generales del Cemento Portland.

El CP es uno de los grandes inventos de la humanidad. Este material ha sido altamente usado desde su aparición a principios del siglo XIX. Hoy en día el CP se utiliza en concreto, mortero y en muchas otras aplicaciones. El CP es un polvo mineral o inorgánico que se endurece al mezclarse con agua y une agregados como arena o grava. En 2024, se estimó que se generaban 1.27 millones de toneladas de CP a nivel mundial [11].

Para 2021, estos números aumentaron a un 51.5 millones de toneladas de producción, según la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) la cual representa a las seis cementeras actuales de México: Moctezuma, Cementos Fortaleza, CEMEX México, Cemento Cruz Azul, Grupo de Cementos Chihuahua y HOLCIM México [12]

El CP tiene diversos componentes, siendo el principal el clínker. Este es un producto en forma de gránulos o pequeñas bolas, de entre 0.5 y 25 mm, que se forma apartir de la calcinación de caliza y arcilla y otros componentes minoritarios, a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450° C [13].

El Clinker del CP es un material hidráulico (material que reacciona químicamente y forma productos al tener contacto con el agua) que debe estar constituido por las siguientes fases químicas:

- Silicato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) o Alita (C_3S) – Determina la mayoría de las propiedades del cemento; endurece rápidamente y alcanza una gran resistencia cuando se muele finamente y se mezcla con agua.
- Silicato Dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) o Belita (C_2S)
- Ferrito Aluminato Tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) o Ferrita (C_4AF).
- Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) o Celita (C_3A).

2.1.2. Fabricación del Cemento Portland y su Impacto Ambiental.

La fabricación del cemento es un proceso industrial que se realiza en instalaciones de gran escala. Las materias primas se mezclan en proporciones controladas y molidas, son cocidas en hornos rotatorios a temperaturas superiores a $1,400^\circ\text{C}$ dando lugar al clínker el cual, molido y con una adición de yeso, constituye el CP, tal como se muestra en la figura 1.

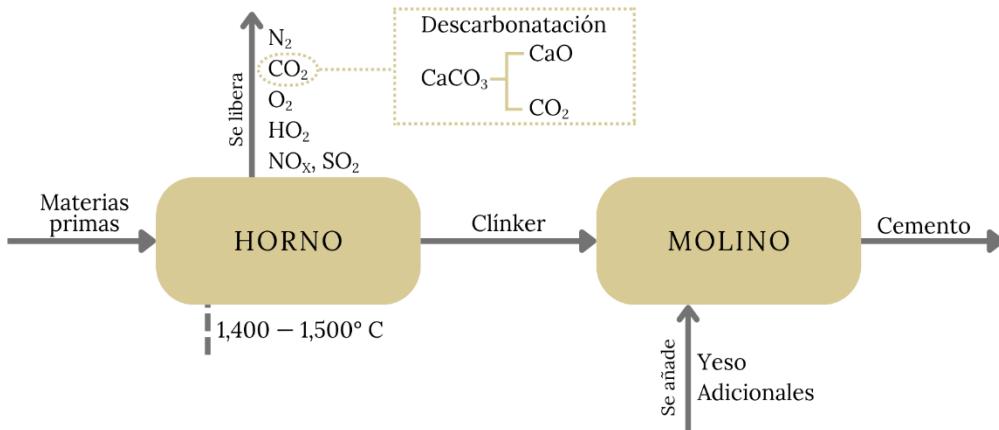


Figura 1. Fabricación del Cemento Portland.

Las materias primas, previamente molidas, son precalentadas mediante una serie de gases de combustión. A medida que la temperatura alcanza los 550° C comienzan a descomponerse en compuestos como el carbonato de calcio (CaCO₃) y carbonato de magnesio (MgCO₃), liberando CO₂ y formando óxidos como CaO y MgO. Entre los 900 y 1200° C se inicia la formación de C₂S y, después, entre 1200° y 1280° C se forman los componentes como C₃S, C₃A y C₄AF. Una vez el clíker alcanza la temperatura máxima, cerca de 1450° C, se enfriá a unos 100° C mediante aire ambiente y, posteriormente, se traslada al molino para su molienda con yeso y otros aditivos [14].

La fabricación de CP se considera una de las actividades industriales con mayor generación de emisiones de CO₂ en el mundo. Se estima que se emiten aproximadamente 900 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producida. Estas emisiones provienen de diferentes fuentes; cerca del 40% se origina en la combustión de combustibles fósiles utilizados para alcanzar las altas temperaturas del horno: un 10% corresponde al consumo

energético en transporte, operación de equipos y otras instalaciones y, el restante 50% se libera durante la descomposición del CaCO_3 y MgCO_3 , cuyas reacciones químicas generan los óxidos necesarios para la formación del clínker [14].

2.1.3. Proceso de hidratación del cemento.

El proceso de hidratación del cemento es un conjunto de cambios físicos y reacciones químicas, sin embargo, como el clínker es un material con muchas impurezas, se considera que existen muchas variables que complican su entendimiento completo.

El proceso de hidratación del cemento dura más de 28 días y, después de estos, solo el 70% de la C_3S ha reaccionado. Se podría decir que esta termina de reaccionar después de un año. Dicho proceso se divide en cinco etapas, las cuales se muestran en la figura 2 [15].

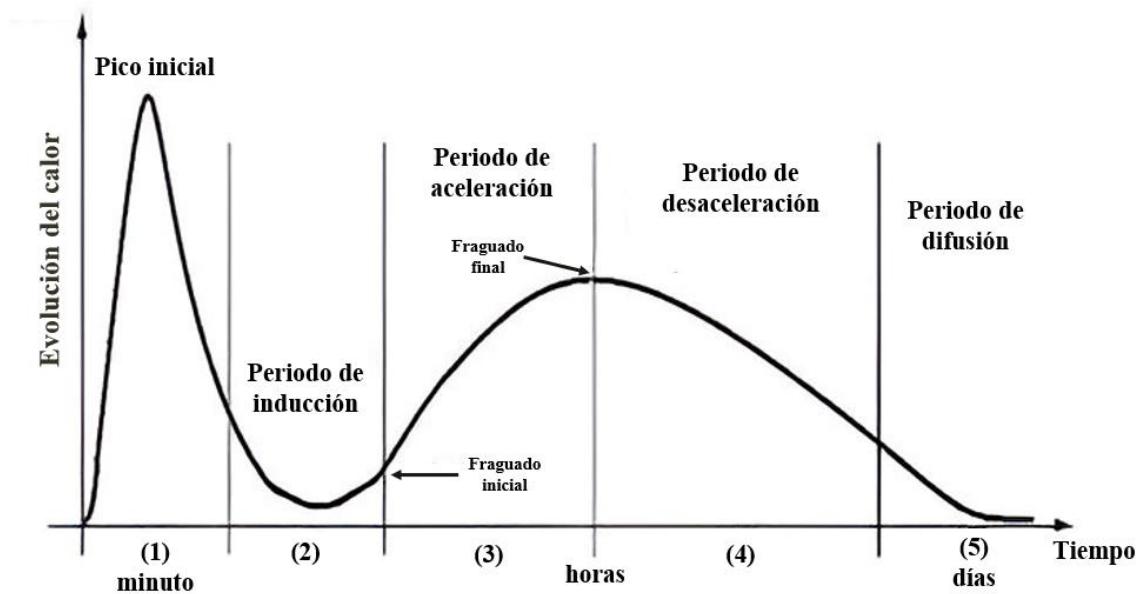


Figura 2. Evolución del calor durante el proceso de hidratación del CP.

- Etapa 1. – Pico inicial.

El clinker se disuelve rápidamente, liberando iones de Si^{4+} , Ca^{2+} y OH^- . Esto sucede hasta que comienza a formarse el gel CSH. Durante esta etapa se forma etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$), los cuales comienzan a aparecer por la disolución de C_3A .

- Etapa 2. – Periodo de inducción.

La hidratación se ralentiza y la pasta de cemento sigue siendo fluida. Algunos autores afirman que durante esta etapa se forma una capa fina sobre los granos de C_3S , evitando que se disuelvan y, posteriormente, reaccionen [16].

- Etapa 3. – Periodo de aceleración.

La reacción se reinicia y, como el gel CSH es termodinámicamente estables, se forma alrededor del grano. Mientras más núcleos existan, más rápido será el proceso de hidratación. El final de la etapa corresponde al final del fraguado y al máximo calor liberado.

- Etapa 4. – Periodo de desaceleración.

En esta etapa, la cinética se controla por la difusión de los iones de Ca^{2+} y Si^{4+} en el producto los cuales son capaces de atravesar la estructura porosa del gel.

La reacción se ralentiza a medida que se realiza la hidratación. En esta etapa, la etringita se transforma en monosulfatos ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$).

- Etapa 5. – Periodo de difusión.

La microestructura del gel CSH se vuelve más densa y la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y los monosulfatos continúan creciendo. La reacción se ralentiza a medida que la matriz de cemento gana resistencia.

2.2. El vidrio: clasificación y su potencial como material sustituto.

Según la Sociedad Americana de Pruebas de Materiales (ASTM), el vidrio es un producto inorgánico por fusión, que al enfriar adquiere una condición rígida sin cristalizar. Por lo general, es un material duro y frágil, y puede ser incoloro o coloreado, así como transparente u opaco dependiendo de su composición [17,18].

La fabricación del vidrio se hace en un horno en donde se calienta una mezcla que, normalmente, consiste en arena sílica (arcillas) y óxidos metálicos secos pulverizados o granulados. En este proceso se obtiene un líquido viscoso y la masa se hace transparente y homogénea a temperaturas mayores a 1000° C. Al sacarlo del horno, el vidrio adquiere una rigidez que permite darle forma y manipularlo [19].

2.2.1. Clasificación de los vidrios.

La naturaleza química y mineralógica de la arcilla empleada es un factor importante para las propiedades del vidrio resultante. Al incorporar distintos compuestos químicos con la materia prima se obtienen distintos tipos de vidrio, como se exhibe en la tabla I con los porcentajes correspondientes a cada uno [19]. En la mayoría de las estructuras de los vidrios inorgánicos, el formador de red principal es el SiO₂ [17].

Tabla I. Tipos de vidrio.

Elementos	Sódico – Cálcico (%)	Plomo (%)	Borosilicato (%)	Sílice (%)
Sílice	70 – 75	53 – 68	73 – 82	96
Sodio	12 – 18	5 – 10	3 – 10	
Potasio	0 – 1	1 – 10	0.4 – 1	
Calcio	5 – 14	0 – 6	0 – 1	
Plomo		15 – 40	0 – 10	
Boro			5 – 20	3 – 4
Aluminio	0.5 – 3	0 – 2	2 – 3	
Magnesio	0 – 4			

La tabla presenta algunos de los vidrios más comunes, junto con los porcentajes aproximados de sus componentes principales, lo que permite observar cómo pequeñas variaciones en la formulación modifican las propiedades finales y, en consecuencia, determinan su aplicación específica.

2.2.1.1. Vidrio sódico cálcico.

También llamado vidrio soluble, está formado por sílice, sodio y calcio principalmente. La sílice es parte de la materia prima básica, el sodio facilita la fusión porque reduce la cantidad de enlaces cruzados entre el oxígeno y el silicio y el calcio provee una estabilidad química; sin calcio, este vidrio sería soluble al contacto con el agua. La resistencia química del VSC mejora conforme se aumente el contenido de sílice, porque esta es poco reactiva [18–20].

Este tipo de vidrio es el que se funde con mayor facilidad y el más barato, por eso la mayor parte del vidrio incoloro y transparente tiene esta composición: botellas, utensilios de cocina, etc.

2.2.1.2. Vidrio de plomo.

Este tipo de vidrio se caracteriza por reemplazar el CaO por óxido de plomo. Se mantiene la transparencia del vidrio, sin embargo, es mucho más denso, lo que le otorga un mayor índice de refracción y dispersión de la luz. Posee propiedades aislantes y una notable capacidad para absorber radiación ultravioleta y rayos X, lo que permite que sean utilizados para ventanas protectoras y equipos como radares o radios [19].

2.2.1.3. Vidrio de borosilicato.

Creado en 1912, el vidrio de borosilicato tiene como componentes principales la sílice y el óxido de boro. Es prácticamente inerte, difícil de fundir y de trabajar, pero tiene resistencias elevadas a los cambios de temperatura bruscos, aunque no tan elevado como los vidrios de sílice puros. Por esta última razón son empleados en refractarios para hornos y en material de laboratorio [20].

2.2.1.4. Vidrio de sílice.

Formado con 96% de sílice, este tipo de vidrio es el más duro y el más difícil de trabajar, sin embargo, tienen una estabilidad grande y una temperatura de reblandecimiento de 1500° C, por lo que pueden soportar hasta 900° C. Por estas propiedades, el vidrio de sílice se utiliza en la fabricación de material de laboratorio que requiere una resistencia alta al calor, como los crisoles, tubos de protección para termopares, revestimientos de hornos, entre otros [20].

2.2.2. El vidrio como sustituto del Cemento Portland.

Las puzolanas son materiales inorgánicos, silíceos o silicoaluminosos que por sí solos presentan poca o ninguna propiedad aglutinante, pero finamente molidos y en presencia de agua el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reaccionan y forman compuestos con propiedades aglutinantes a temperatura ambiente. Por lo tanto, estos materiales pueden incorporarse durante la producción de CP para formar otros tipos de cemento. Se le conoce como “actividad puzolánica” a la capacidad de los materiales de reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, un subproducto de la reacción del cemento en agua, para formar compuestos con propiedades cementantes [21].

2.2.2.1. Materiales activados alcalinamente.

Los materiales activados alcalinamente (MAA) son obtenidos de la activación alcalina de un precursor sólido, generalmente escorias o cenizas volantes, el cual es un aluminosilicatos, lo que ofrece la posibilidad de emplear diversos residuos y subproductos como materias primas. El activador es un álcali, como el hidróxido de sodio o potasio, y tiene como función el promover la disolución del precursor y la posterior polimerización de diferentes productos de hidratación formados (similares al gel C–S–H). Los MAA tiene la ventaja de ser obtenidos a temperatura ambiente a partir de precursores como la ceniza volante, escorias metalúrgicas, vidrio, humo de sílice, entre otros [22]

Los MAA se pueden dividir en aquellos con alto o bajo contenido de Ca; los que presentan un alto contenido de esté producen un gel de tipo aluminosilicatos de calcio hidratado (CASH) con una estructura lineal $[\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ mientras que los que contienen bajo contenido de Ca forman geles de tipo aluminosilicatos de sodio hidratado (NASH) con una estructura tridimensional $[\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$, de esta forma al

unir el VSC y CP se podría obtener la ecuación $\text{SiO}_2(\text{vidrio}) + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [23].

La activación alcalina requiere dos componentes básicos: aluminosilicatos amorfos o vítreos y un activador alcalino; los aluminosilicatos pueden ser productos naturales como el metacaolín o subproductos industriales como escorias de alto horno o cenizas volantes [24]. El uso de polvo de vidrio reciclado, específicamente el VSC, para generar sistemas activados alcalinamente puede ser útil debido al alto contenido de sílice y sodio con el que cuenta; de esta forma, el uso del vidrio como sustituto del CP es factible [25].

Los activadores alcalinos desempeñan un papel clave en el desencadenamiento de las reacciones de los precursores, el hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na_2SiO_3) son los activadores más utilizados para la preparación de MAA; para la producción de ambos, especialmente del Na_2SiO_3 , se consume una alta cantidad de energía lo cual resulta en emisiones de CO_2 . La producción de estos activadores requiere la fusión de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y SiO_2 en un horno a temperaturas de hasta 1500°C [26].

2.2.2.2. Uso del vidrio como sustituto del cemento con y sin activadores.

Una de las alternativas más utilizadas en la actualidad, en el área de la construcción, para reducir el CO_2 es el remplazo de los materiales crudos usados en el clínker con recursos naturales. El uso de estos materiales, los cuales terminan siendo perjudiciales para el medio ambiente, ayuda a reducir el uso de materias primas y energía y, a su vez, a la eliminación segura de diversos residuos. Específicamente, el reciclaje del vidrio, con contenido de $\text{SiO}_2 > 70\%$, con estructura amorfa y con una gran superficie es un problema ambiental, esto más que nada por su alto costo para reciclaje y las altas cantidades de energía necesarias para su fundición [1].

Según Borges y colaboradores [21] la actividad puzolánica del VSC mejora cuando se tiene en tamaños de partícula pequeños debido a que se tiene una superficie de contacto mayor con lo cual existe una mayor capacidad de reacción entre el Ca(OH)₂ y el vidrio.

De esta manera, se confirma que el vidrio cuenta con propiedades puzolánicas que le permiten desempeñarse como un material alternativo complementario al CP para proporcionar resistencias y durabilidades adecuadas a concretos o morteros cuando este cuente con partículas inferiores a 75 µm. A su vez, ayudará a la formación del gel C-S-H que se une con el Ca(OH)₂, este último se forma por la hidratación del cemento y el agua gracias a la alta actividad puzolánica y contenido de SiO₂ [1].

El uso del vidrio como sustituto del CP, ha sido estudiado conforme el paso de los años, por ejemplo, en 2014, Du y colaboradores [27] realizaron una sustitución de VSC de desecho con tamaños de partícula de 10 µm, sin la utilización de activadores. Analizaron diversos porcentajes de sustitución (0, 15, 30, 45 y 60%) en donde determinaron que el porcentaje de 30% presenta mejores resistencias a compresión a 28 días, siendo que aumenta un 6%, mientras que al realizar una sustitución del 60%, a pesar de mostrar buena resistencia al agua y cloruros, la resistencia a compresión disminuye en un 25%.

Estos mismos investigadores [28], años después, en 2017, volvieron a analizar la sustitución del CP por VSC con los mismos porcentajes mencionados anteriormente, aumentando a tamaños de 75 µm y con la adición de un superplastificante a base de naftaleno. Sus resultados a 28 días demostraron que, para porcentajes de 15, 30 y 45%, las resistencias aumentan un 10, 11 y 17%, respectivamente, mientras que al sustituir con un 60% la resistencia disminuyo un 10%.

Por otra parte, Yin y colaboradores [29] analizaron la sustitución del CP por VSC con porcentajes de 15 y 40% junto con la utilización de un 0.03 a 0.2% de superplastificantes de ácido policarboxílico. Sus resultados mostraron que el uso del 15% de sustitución mejoraba las propiedades mecánicas del material en un 14% mientras que al agregar un 40% estas disminuían en un 18% con respecto a la muestra de referencia.

Otro estudio realizado fue en 2021, por Lopes y colaboradores [2] los cuales evaluaron la sustitución parcial de CP con residuo de vidrio molido en morteros, donde comparaban la resistencia a compresión y reacción álcali-sílice (RAS) de diversas muestras con un tiempo de molienda y porcentaje de sustitución diferentes. Para las mezclas de mortero se utilizó un superplastificante de base policarboxilato éter y los tiempos de molienda analizados fueron de 16 y 32 horas, mientras que los porcentajes variaron de 10, 15 y 20%. Los tamaños de partícula de cada molienda fueron de 40 y 39 μm para 16 y 32 h respectivamente. Los autores determinaron que la RAS no tiene un cambio significativo, demostrando que la expansión disminuía mientras el porcentaje de vidrio aumentaba. Por otro lado, la compresión de las muestras demostró que, a 28 días, se mantienen valores similares entre sí, siendo la muestra control la mayor con 28 MPa, seguida de la de 20% de sustitución y 16 h de molienda al vidrio con 26 MPa.

Cuando el polvo de vidrio se mezcla con agua, la disolución libera OH, esto genera que el polvo de vidrio sea diferente a otro material puzolánico, por ejemplo, Alzeer y colaboradores [30], en 2022, sintetizaron diversos tipos de V con diferente contenido de Na₂O y determinaron que, mientras más contenido de Na₂O se tuviese, se obtendría una mejor disolución. Según los investigadores, una disolución inicial de vidrio promueve el

aumento en el pH. Sin embargo, un exceso de contenido de Na puede generar una RAS que provoque expansiones perjudiciales [30].

Por otro lado, Li y colaboradores [25], en 2024, investigaron sobre la autoactivación de los polvos de vidrio como un activador para materiales cementantes. En este caso, los investigadores determinaron que la disolución de los polvos de vidrio podía liberar iones de sodio para formar una solución alcalina que, posteriormente, permitió aumentar las propiedades mecánicas. Analizaron tres tipos de vidrio; en el caso del VSC, con tamaños de partícula de aproximadamente 10 μm , demostró ser el más reactivo y, al sustituir un 50% de éste, se obtuvo una resistencia a compresión de 20 MPa, siendo el que presentaba mejores propiedades ante esta cantidad de porcentaje.

La revisión de investigaciones previas permite contar con datos sobre cómo el uso del VSC puede afectar diversas propiedades de los morteros, especialmente al aplicar altos porcentajes de sustitución y diferentes tamaños de partícula, destacando que en la mayoría de los estudios se ha reportado el uso de activadores para el vidrio.

Según la información analizada, en general, los porcentajes menores al 30% con tamaños de partículas finas (10 a 75 μm) son aquellos que muestran una mejoría en la resistencia a compresión y flexión. Por otro lado, también indican la necesidad del empleo de activadores, como diversos superplastificantes, para la correcta integración del vidrio en la matriz cementante. Con esto se puede obtener un punto de partida para determinar los factores principales para el VSC y los porcentajes a utilizar en el presente trabajo.

2.3. Nanociencia y nanotecnología en la construcción.

La nanotecnología consiste, por una parte, en la fabricación de materiales cuyo tamaño es nanométrico, es decir, entre 1 y 100 nm, en al menos una de sus dimensiones. En el rango de tamaños nanométricos, los materiales presentan propiedades diferentes a las que tienen en las escalas macroscópicas, submicroscópicas o subnanométricas, aunque hay excepciones. Considerando esto último, la otra parte de la nanotecnología se enfoca en el aprovechamiento de estas propiedades únicas que surgen de la nano escala [31].

En el ámbito de la construcción, la nanotecnología se enfoca, principalmente, en la mejora de la calidad del concreto, esto debido a que el concreto es un material compuesto, nanoestructurado y multifásico que se forma con una parte amorfa y agua. Esta fase amorfa es el conocido gel CSH el cual es el componente que mantiene unido al concreto [32] La nano modificación del concreto es un proceso que se está desarrollando rápidamente y ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos aditivos de cemento como nuevos superplastificantes, nanopartículas o nanorefuerzos. Dentro de los principales materiales que se han comenzado a utilizar son: nano-sílice, nano-óxido de titanio , nano-hierro, nano-alúmina, nanoarcilla, NTC y nano fibras de carbono (FNC) [32].

2.3.1. Nano sílice.

La nano sílice son nanopartículas de sílice amorfa las cuales han demostrado proporcionar una mejora a la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto ya que aumentan la resistencia a la penetración del agua y controla la lixiviación del calcio, lo

cual está relacionado con diversas degradaciones del concreto. Además, este material permite acelerar las reacciones de hidratación del C₃S y ser más eficaz que el humo de sílice [32].

Este nanomaterial puede acelerar la velocidad de hidratación de los materiales aglutinantes; esto se debe a la superficie específica y naturaleza amorfa que tiene, la nSiO₂ tiene una actividad puzolánica relativamente alta que ayuda a la formación de gel CSH adicional. De igual manera, al tener partículas más pequeñas a las del cemento, permite mejorar el empaquetamiento de partículas [33].

De entre algunos de los estudios realizados con respecto a la nSiO₂ sobresale el de Garg y colaboradores [34] donde se comparó el uso de la micro sílice y la nSiO₂ en morteros, evaluando cómo es que estos materiales podrían afectar las propiedades del material cementante. Referente a la nSiO₂ se utilizaron partículas de 40 nm con proporciones de entre 0.5 a 1.25%. Con este material, se aumentó para 0.5, 0.75, 1.0 y 1.25%, de adición de nSiO₂, un total de 15, 19, 22 y 21% la resistencia a compresión con respecto a un mortero convencional a 28 días, a su vez se determinó que el mejor porcentaje a utilizar era el de 1.0%.

Junto a esto, Ramezanianpour y colaboradores [35] realizaron una investigación sobre el efecto sinérgico de la nSiO₂ y las puzolanas naturales en estructuras de morteros simples, específicamente para la nSiO₂ se utilizaron reemplazos de 2, 3 y 4% con respecto al cemento. Utilizando un nanomaterial de 15 nm, mezclada por 15 min en agua en un ultrasonido y con la adición de un superplastificante a los morteros, la nSiO₂ mostró un incremento en la resistencia a la compresión para todas las edades, siendo la mejor la que

presenta un 4% de sustitución debido al aumento de 16% con respecto a un mortero convencional de 28 días.

El-Didamony Ahmed y colaboradores [36] realizaron un estudio sobre las propiedades químicas y físico mecánicas de morteros con micro sílice y nSiO₂. El nanomaterial contaba con un tamaño de partícula promedio de 15 nm y un área superficial de 50 m²/g. Dentro del estudio se realizaron sustituciones de CP por nSiO₂ con porcentajes de 0.5, 1 y 1.5 de donde se determinó que, a 90 días, los valores de resistencias incrementaban, siendo la sustitución del 1% la que mostraba mejores resultados, aunque los tres porcentajes analizados mostraron mejorías con respecto a la muestra control. Los autores concluyeron que la nSiO₂ se comporta tanto como un relleno que como un activador que promueve la reacción puzolánica.

En 2017, Yu y colaboradores [33] evaluaron el efecto de la nSiO₂ en la resistencia a compresión y a flexión en morteros al adicionar el 0, 0.5, 1 y 1.5% del nanomaterial, aparte se utilizó un superplastificante para realizar las mezclas. El efecto del nanomaterial en la resistencia a compresión, comparado con el mortero de control, mostró un incremento al añadir la nSiO₂, siendo que para 0.5, 1 y 1.5%, a 28 días, se obtuvieron 48, 53 y 56% de mejoras, respectivamente. Así mismo, la resistencia a flexión demostró un aumento de entre 22.3 a 33.6% respectivamente.

Un estudio relevante de 2012 sería el realizado por Aly y colaboradores [37] quienes analizaron el comportamiento de la nSiO₂ en compuestos con vidrio de desecho. El vidrio contaba con un tamaño de 75 µm y se realizaron muestras con 20 y 40% de sustitución por vidrio y 3% de nSiO₂. A 28 días, se obtuvieron resultados favorables, para resistencias

a compresión y flexión, siendo favorable la sustitución del 20% con un aumento del 32% y 48% respectivamente.

El estudio de la nSiO₂ en morteros es fundamental debido a que permite comprender y optimizar el comportamiento en su microestructura y en aplicaciones reales. A pesar de las diversas mejoras que este puede presentar, su desempeño puede variar dependiendo del tipo de cemento, condiciones de curado, dosificación e incorporación del material. De igual manera, un factor importante a considerar, al tener un tamaño nanométrico, es la posible aglomeración de partículas.

2.3.2. Nanotubos de carbono.

Los NTC son los candidatos más potenciales para poder utilizarse como un nanorefuerzo en materiales con base de cemento. Estos presentan una amplia resistencia con módulos de elasticidad, resistencia a la tracción y tienen propiedades electrónicas y químicas únicas. Los NTC están constituidos por redes hexagonales curvadas y cerradas de carbono, que forman tubos de carbono nanométrico. De estos, existen dos tipos; los nanotubos monocapa (un solo tubo) y los multicapa (varios tubos dentro uno de otro). Son estructuras ligeras, huecas y porosas, con altas resistencias mecánicas [32].

Tal como con la n-SiO₂, los NTC han sido estudiados a lo largo de los últimos años, por ejemplo, Hu y colaboradores [38] estudiaron las propiedades mecánicas y la porosidad de un mortero con adición de NTC, donde se compararon dos porcentajes: 0.05 y 0.5%. Los NTC se agregaron al mortero con un disolvente para promover su dispersión y la longitud de estos fue de 10 µm. Concluyeron que el porcentaje óptimo a utilizar era el de 0.05% debido a que era el que mostraba mejores resistencias a compresión y flexión, obteniendo mejoras de 2.4% y 9.6%, respectivamente, a 28 días.

Asimismo, Cerro-Prada y colaboradores [39] analizaron el efecto de los NTC de pared múltiple en las propiedades de un mortero cementante. Dentro de su trabajo realizaron adiciones de 0, 0.01, 0.015 y 0.02% con un NTC de longitud de 10 μm , el cual fue dispersado en agua por tres métodos diferentes (agitación mecánica, agitación magnética y sonicación) por un aproximado de 1 h y 30 min antes de agregarlo a la mezcla del mortero. Como resultado se obtuvo un aumento en las resistencias a compresión siendo mejor el material con un 0.015% con un aumento del 3% a 28 días. En cambio, para la resistencia a flexión, se obtuvieron mejores resistencias al adicionar un 0.02%, con un 20% de mejora.

Manzur y colaboradores [40] estudiaron diferentes porcentajes de adición de NTC en un rango del 0 al 0.5%. Los NTC utilizados contaban con una longitud de 10 a 30 μm y se utilizó un superplastificante a base de policarboxilato. Los resultados demostraron que las resistencias a compresión y flexión aumentaban, a 28 días, cuando se agregaba 0.1 y 0.3% de NTC aumentaba 15% y 19% respectivamente. Demostraron que la dosificación de 0.1% era mejor que la de 0.3% por muy poco.

El análisis de las investigaciones sobre la adición de nSiO₂ y NTC en morteros permite evidenciar que estos componentes mejoran notablemente las propiedades mecánicas del material. De igual manera, estos nanomateriales permiten determinar el tamaño de partícula y las diversas proporciones que se podrían utilizar para la optimización de estas. A su vez, se logra demostrar que la utilización de dispersantes es crucial para maximizar el rendimiento de estos materiales en la mezcla. En el presente trabajo, se busca emplear un nanorefuerzo compuesto por los nanomateriales antes mencionados, de tal forma que

estos estudios previos permiten concluir que la utilización de ambos puede contribuir a un incremento de las propiedades.

2.3.3. Nanocomuestos.

Los nanocomuestos a base de cemento aprovechan las ventajas de los nanomateriales, generando que las investigaciones al respecto comiencen a ir en aumento. Nanomateriales como la nSiO₂ y los NTC son los que permiten obtener mejoras a las características de los materiales; ambos nanocomuestos pueden llenar poros y disminuir el diámetro de los mismos. Adicionalmente, la nSiO₂ puede producir productos de hidratación más finos los cuales permiten una mejora entre la unión de la matriz cementante con los NTC [41] y, en este caso, del vidrio.

La producción de nanomateriales puede ser realizada mediante procesos de molienda del material a granel (métodos *top-down*) o de síntesis a partir de nucleación con el subsiguiente crecimiento de las partículas mediante condensación y/o coagulación (métodos *bottom-up*). Estos últimos son los más comunes en la fabricación de nanomateriales y se pueden llevar en fase gaseosa, líquida o coloidal [42].

2.3.3.1. Métodos de fase gaseosa.

En los métodos en fase gaseosa los nanomateriales se forman en un reactor a alta temperatura en el que se inyecta el material de partida que puede estar en forma sólida, líquida o gaseosa. También se incluyen los procesos de producción conocidos como *deposición del vapor químico*, debido a que se lleva a cabo en reactores o en hornos [42].

Entre los estudios realizados, destaca la investigación realizada por Raza y colaboradores [41] donde se utilizaron NTC y n-SiO₂, con tamaños de 10–30 μm y 10–20 nm, respectivamente, para comparar las propiedades mecánicas de morteros con diferentes porcentajes de los nanomateriales. Se utilizaron porcentajes de 0, 0.3, 0.6 y 1% de NTC a las cuales se les añadieron 0, 1, 3 y 5% de n-SiO₂, realizando una mezcla física, donde ambos materiales fueron añadidos al agua junto con un plastificante y se mezclaron por 2 min. Los investigadores evidenciaron que la mezcla con 0.6% NTC y 5% de n-SiO₂ y la de 0.3% NTC y 5% de n-SiO₂ mejoraban la resistencia a compresión y flexión en un 17.2% y 52% respectivamente.

Por igual, Varisha y colaboradores [43] estudiaron el efecto de un nanocompuesto de NTC, con tamaños de 1–5 μm y 10–20 μm, y nSiO₂, de 12 nm, en morteros, con una proporción del 0.3% de NTC y 1% de nSiO₂ del peso de cemento. Para lograr una dispersión homogénea de los nanomateriales, fueron sometidos a una sonicación durante 20 minutos, adicionando un 0.4% de superplastificante (MgSO₄). Con una dosificación de 0.3% de NTC y 1% de n-SiO₂ se observó que existe un aumento del 20% en las resistencias a compresión a 28 días, demostrando el potencial de estos nanocompuestos para la mejora de las propiedades mecánicas de los morteros.

2.3.3.2. Métodos en fase líquida o coloidal.

En los métodos en fase líquida o coloidal los nanomateriales se forman mediante reacciones químicas en disolución. Los nanomateriales pueden permanecer en una suspensión líquida o pueden ser procesados, con el fin de obtener un material en forma de polvo, mediante secado o filtración [42].

Mendoza-Reales y colaboradores [44] realizaron un estudio enfocado en el uso de NTC y n-SiO₂, buscando conocer el efecto que estos tenían en las propiedades mecánicas de morteros de CP, donde ambos nanomateriales fueron dispersados en agua, utilizando un superplastificante a base de policarboxilato. Se realizaron adiciones de NTC de 0.025 y 0.225% y, para cada uno de estos, se realizaron adiciones de 3.5, 6.5 y 9.5% de nSiO₂. Para su resistencia a compresión se obtuvieron mejoras significativas con respecto al mortero de control, siendo que la adición del nanocompuesto, a 28 días, permitió un aumento del 16% y para flexión se disminuyó un 7% mientras más nanocompuesto era agregado.

En 2022, Mishra [45] analizó el efecto de dispersar NTC y n-SiO₂ antes de su utilización en sistemas cementantes. Se utilizaron NTC de multipared con un diámetro de entre 20 y 30 nm y una longitud de entre 3 a 8 μm y una n-SiO₂ amorfa, con rangos de tamaño de entre 30 a 100 nm. Estos materiales fueron dispersados en un ultrasonido, utilizando un dispersante llamado Brij35, el cual es un polioxietileno lauril éter. La investigadora realizó adiciones de NTC de 0.05, 0.1 y 0.2%; mientras para nSiO₂ utilizó 1 y 2%. La mezcla de 0.05% y 0.1% NTC con 2% de n-SiO₂ demostró una mejoría del 20% con respecto a la muestra control en resistencia a compresión y para flexión, la muestra de 0.05% y 2% de nSiO₂ demostró un aumento de 12%.

2.4. Hipótesis.

La incorporación de vidrio de desecho sódico cálcico molido y activado mecánicamente, en conjunto con un nanorefuerzo de SiO₂/NTC, permitirá preparar un mortero ecológico con hasta 50% de sustitución parcial de CP, sin necesidad de activadores alcalinos ni dispersantes, manteniendo un desempeño mecánico comparable al de un mortero elaborado exclusivamente con CP.

2.5. Objetivos.

2.5.1. Objetivo general.

Evaluuar el efecto que produce la sustitución parcial, hasta en un 50%, del CP por polvo de vidrio de desecho sódico cálcico activado mecánicamente, en conjunto con la incorporación de un nanorefuerzo de SiO₂/NTC, sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de un mortero para construcción.

2.5.2. Objetivos específicos.

1. Analizar el efecto del tiempo de activación mecánica del polvo de vidrio sobre su reactividad puzolánica y su capacidad para dispersar el nanorefuerzo, mediante la evaluación de cambios en el pH, la disociación de iones metálicos y los resultados de

la prueba R³, con el fin de cuantificar su desempeño como material cementante suplementario.

2. Evaluar el comportamiento mecánico de un mortero con 20% de sustitución parcial de CP por vidrio de desecho activado mecánicamente, utilizando diferentes tiempos de activación con el fin de determinar el tiempo de activación mecánica que favorece en mayor medida la reactividad del sistema.
3. Evaluar los cambios en la cinética de hidratación, los productos de hidratación, las características microestructurales y el comportamiento mecánico de morteros con sustituciones parciales de 20, 30, 40 y 50% de CP por vidrio de desecho, con el propósito de establecer la relación entre el pretratamiento aplicado al vidrio y la cantidad incorporada como material cementante suplementario.
4. Estudiar el efecto del reforzamiento generado por la incorporación de 0.025% de nanorefuerzo SiO₂/NTC en morteros con sustituciones parciales de CP por vidrio de desecho mediante pruebas de compresión y flexión, buscando establecer la relación entre la magnitud del reforzamiento mecánico y el porcentaje de sustitución.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para conseguir los propósitos establecidos para esta investigación, se diseñó una metodología experimental que permitió evaluar las características mecánicas y microestructurales de los morteros con adición del nanorefuerzo de SiO₂/NTC y los diferentes porcentajes de sustitución. Este capítulo aborda a fondo los procesos necesarios, para cada una de las etapas planteadas para la obtención de diversos resultados y su posterior análisis para la optimización de este material. De igual manera se abordan las diversas técnicas de caracterización y pruebas mecánicas realizadas para fundamentar cada una de las etapas.

Por esta razón, en la presente se realizaron variaciones de sustituciones de CP por VSC (de 20% a 50%) con la adición de un 0.025% de nanorefuerzo de SiO₂/NTC con una relación a/c base del 0.49. Considerando esto y los objetivos mencionados previamente, se plantearon las etapas experimentales mostradas en la figura 3.

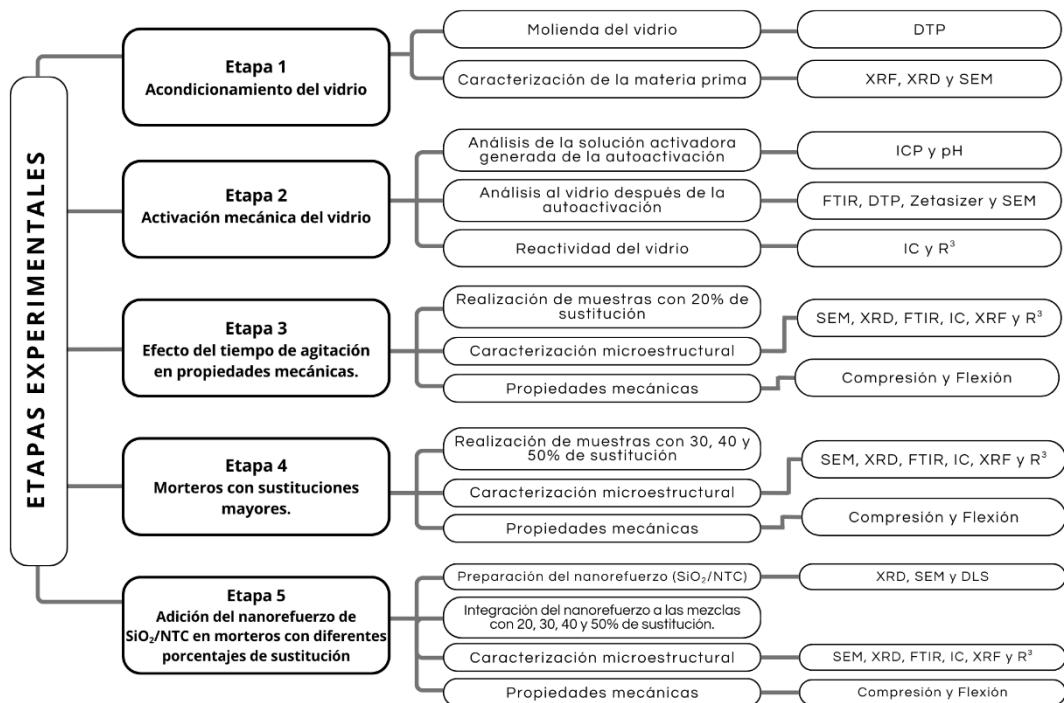


Figura 3. Etapas experimentales de la investigación.

Para determinar la combinación optima de variables que produzcan los mejores resultados de trabajó con un diseño. En la tabla II se muestra la organización de parámetros considerada para cada uno de los morteros, teniendo como factores la sustitución de vidrio entre un 20 a un 50%. La adición del 0.025% de nanorefuerzo, se estableció como un factor fijo en el diseño.

Tabla II. Diseño.

Variables	Muestras												
	C	VA20	VP20	VN20	VA30	VP30	VN30	VA40	VP40	VN40	VA50	VP50	VN50
CP (%)	100	80			70			60			50		
Vidrio (%)	—	20			30			40			50		
Nano refuerzo (%)	—	—	—	0.025	—	—	0.025	—	—	0.025	—	—	0.025

NOTA.- VA es el mortero con vidrio agregado, sin activación mecánica; VP es el mortero con vidrio agregado, donde el vidrio paso por el proceso de activación mecánica y VN el mortero con vidrio agregado, con el proceso de activación mecánica, y la adición del nanocompuesto.

3.1. Materiales de partida.

En el presente apartado se describe el origen, tipo y/o naturaleza de los materiales a utilizar para la realización de la investigación, con la finalidad de dar a conocer las condiciones de las cuales proviene cada una de las materias primas y reactivos.

- Cemento Portland Compuesto.

Se utilizó un Cemento Portland Compuesto (CPC) de 30 MPa a 28 días, con las condiciones de curado y relación a/c adecuadas, de la marca CEMEX.

- Vidrio sódico cálcico.

El VSC se obtiene como desecho, donado por la empresa CRISA Libbey México, ubicada en el municipio de Monterrey, Nuevo León. Siendo un vidrio transparente, se considera un VSC cuando su composición integra los elementos siguientes, dentro de su respectivo porcentaje: del 70 a 75% de sílice, del 10 a 15% de CaO+MgO y de 12 a 16% de Na₂O+K₂O según la ISO-12775 [46] la cual establece los tipos de vidrio y los métodos de ensayo de sus

propiedades químicas y físicas. Este material será utilizado como puzolana artificial debido a su alto contenido de sílice y calcio.

- Nanotubos de carbono.

Los NTC son del tipo multipared, de 20 a 30 nm de diámetro y de 10 a 20 μm de longitud, con radicales del grupo hidroxilo (OH^-) y con pureza del 95%, son de la marca US Research Nanomaterials Inc.

- Nanosílice.

La nSiO_2 utilizada son nanopartículas de dióxido de silicio de 20 a 30 nm con una pureza mayor al 99% de la marca US Research Nanomaterials Inc.

- Arena No. 4.

Se utilizó una arena No. 4, para mantener una granulometría uniforme, de la marca Tecno Arena Monterrey.

3.2. Desarrollo experimental.

Se describirá a fondo el desarrollo experimental por etapas de la investigación, desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la dosificación óptima para los morteros, siendo aquella la que presente los mejores resultados con respecto a su resistencias mecánicas.

3.2.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.

La primera etapa por realizar se centra en el acondicionamiento del vidrio; para esto se lavó el material con agua y jabón, asegurándose de eliminar cualquier suciedad en éste y, de ser necesario, se limpió el material con acetona antes de lavar.

Una vez obtenido el vidrio limpio se procedió a realizar la molienda en tres etapas, hasta obtener un tamaño menor a 70 μm . La primera etapa de molienda consistió en la trituración del vidrio mediante una trituradora de quijadas, operada durante 30 minutos, con la cual se obtuvieron fragmentos de aproximadamente 30 mm. Posteriormente, el material triturado se sometió a una pulverizadora BICO INC durante otros 30 minutos, alcanzando tamaños cercanos a 5 mm. Finalmente, el material procesado se introdujo en un molino de bolsa con medios de molienda de alúmina durante 2 horas, con el fin de obtener un polvo fino de vidrio con un tamaño promedio de partícula cercano a 70 μm .



Figura 4. Metodología, etapa 1.

Después se procedió a realizar un análisis de distribución de tamaño de partículas (DTP), microscopía electrónica de barrido (SEM), fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (XRD) a una muestra del vidrio y los materiales de partida, en este caso al CP. Este proceso se explica en la figura 4.

3.2.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.

Una vez analizados los materiales de partida, se procedió a la etapa 2 que fue enfocada en la activación mecánica del material principal: el vidrio. Para esto se realizaron análisis al vidrio en diferentes horas de activación, en este caso 0, 1, 2, 3, 4 y 24 horas, siendo el vidrio de 0 horas la muestra de referencia. La activación mecánica se realizó añadiendo la cantidad de vidrio, necesaria para la sustitución, en el agua destilada con una relación a/c= 0.49, como se observa en la figura 5.

Para analizar el comportamiento del material se realizaron las pruebas de espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo (ICP), potencial de hidrógeno (pH), espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), SEM, DTP, calorimetría isotérmica (IC) y reactividad del material puzolánico (R^3 , Reactive Reference Reactivity) con el fin de analizar los cambios en el agua y el vidrio. Para así poder determinar el mejor tiempo de activación a utilizar para sustituciones mayores.

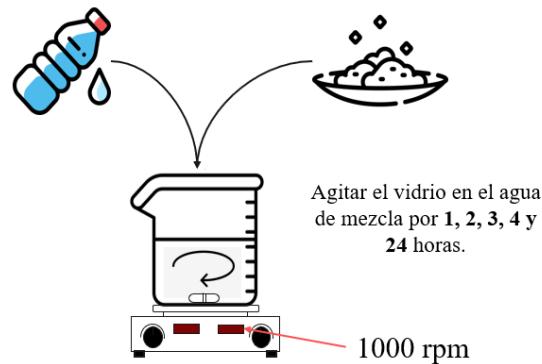


Figura 5. Metodología, etapa 2.

3.2.3. Etapa 3. Efecto del tiempo de agitación en propiedades mecánicas.

Se elaboraron morteros con un 20% de sustitución, con la finalidad de analizar el efecto de la activación mecánica del vidrio en las propiedades de compresión y flexión del material. Para esto, se mantuvo la relación a/c de 0.49 y, siguiendo la normativa ASTM C305 [47], se realizaron los morteros. De acuerdo con lo que dicta la norma, se debe colocó el agua de mezcla (en este caso con el vidrio, después de su correspondiente tiempo de activación) y el cemento en una batidora, se mezcló por 30 segundos a velocidad baja para después agregar la arena y mezclar por otros 30 segundos. Al terminar el tiempo, el equipo se apagó y se limpió las paredes de la olla para dejar reposar la mezcla por 1 minuto con 15 segundos antes de volver a encender el equipo y mezclar por 1 minuto. Al terminar con la mezcla, se colocó ésta en moldes para la elaboración de cubos y vigas que serán utilizados en las pruebas de resistencia a compresión y flexión, como se muestra en las figuras 6 y 7.

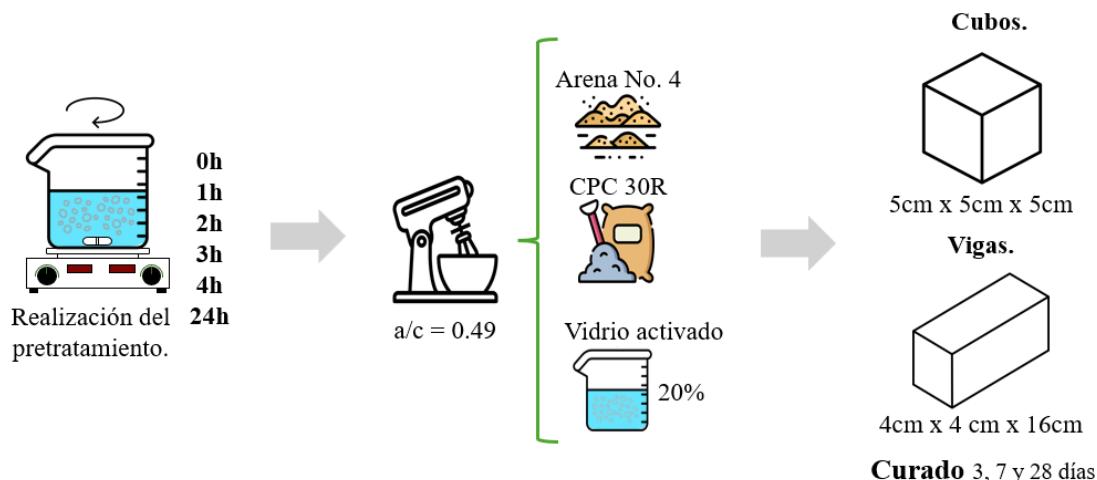


Figura 6. Metodología, etapa 3.

Para la compresión de morteros, se aplicó la normativa ASTM C109 [48], se elaboraron cubos de 50x50x50 mm los cuales fueron curados en agua (por 3, 7 y 28 días). Una vez

pasado el curado, los cubos fueron medidos y, posteriormente, colocados en una prensa hidráulica, INSTRON 600DX, donde se aplicó una carga de 90 kg/s y se calculó la resistencia a compresión al dividir la carga ejercida entre área de la sección.

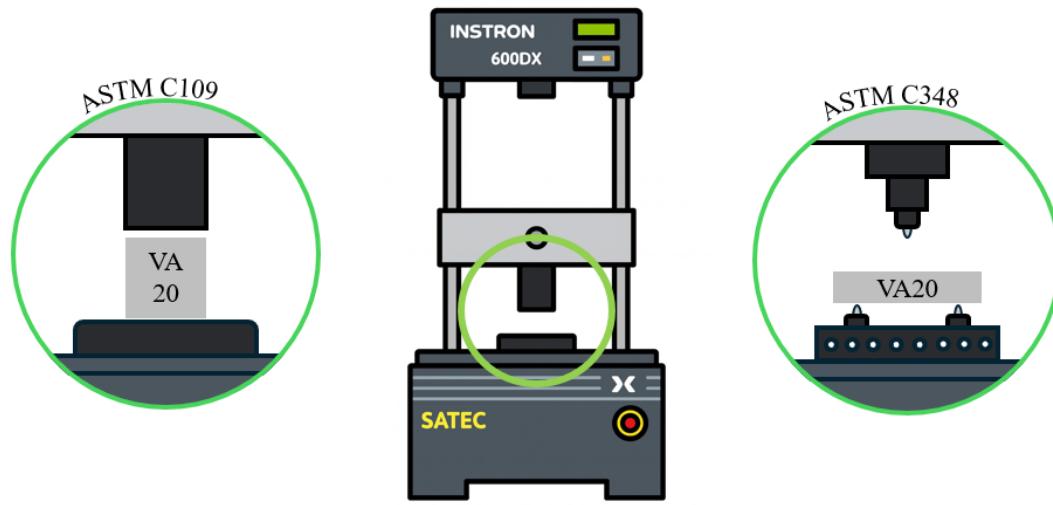


Figura 7. Pruebas mecánicas.

Por otro lado, para la prueba a flexión de los morteros, se aplicó la normativa ASTM C348 [49]. Se elaboraron vigas de 40x40x160 mm las cuales fueron curadas en agua (por 3, 7 y 28 días). Al pasar el curado, las vigas fueron medidas y colocadas en la prensa, considerando 3 puntos, dos a los extremos inferiores y uno en el centro superior, antes de aplicar una carga de 1 mm/s y, después, calcular su resistencia al dividir la carga ejercida entre el área de la sección.

Las muestras fueron analizadas por la técnica SEM para identificar la morfología que presentan. El análisis de los resultados obtenidos en la etapa 2 y 3 determinarán el tiempo de activación óptimo para la obtención de mejores propiedades en el mortero.

En este caso, siendo el de 3h, por su contenido de sodio será de gran importancia para la generación del ambiente alcalino para su posterior uso como activador y dispersante.

3.2.4. Etapa 4. Morteros con sustituciones mayores: 30, 40 y 50%.

Una vez determinado el mejor tiempo de activación mecánica del vidrio, siendo el de 3h, se trabajó en la elaboración de morteros con 30, 40 y 50% de sustitución, siguiendo las normativas antes mencionada. Este proceso es ilustrado en la figura 8.

En este caso, y para los periodos faltantes del 20% de sustitución, se curaron los morteros por 3, 7, 28, 90 y 180 días antes de realizar las pruebas de resistencia a compresión y flexión, esto con el fin de determinar si el vidrio tiene una reacción retardada con respecto a las resistencias de los materiales.

Se llevaron a cabo análisis de calorimetría para las diferentes muestras y, para las muestras de 28, 90 y 180 días, se analizaron sus características microestructurales mediante las técnicas XRD, XFR, FTIR y SEM.

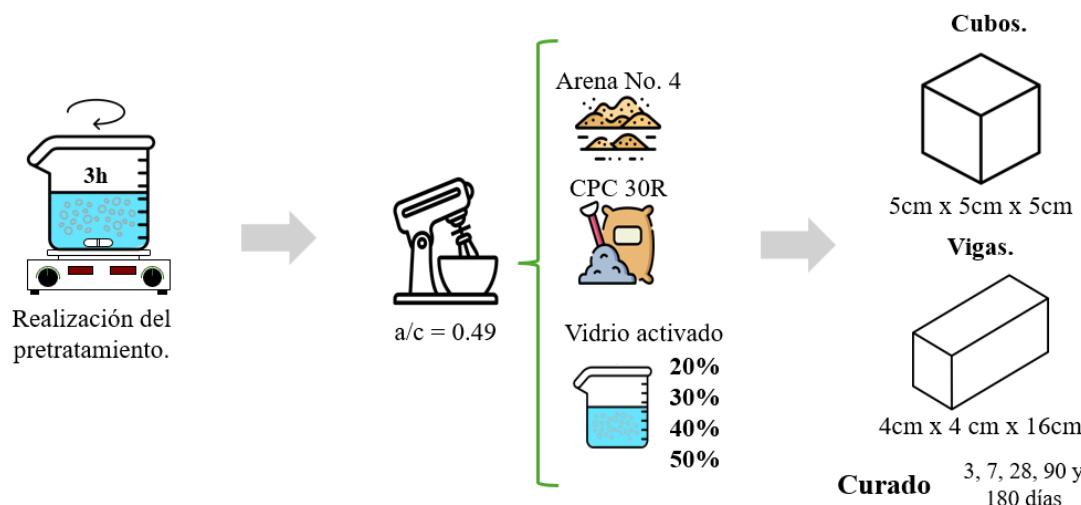


Figura 8. Metodología, etapa 4.

3.2.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerzo de SiO₂/NTC en morteros con diferentes porcentajes de sustitución

Para la etapa 5 se comenzó con el análisis microestructural de los nanomateriales de forma individual, en este caso analizando XRD, XFR y SEM de cada uno para poder compararlo, posteriormente, con el nanorefuerzo a realizar.

Después de esto se procedió a realizar el nanorefuerzo preparando una mezcla de 0.01 g de nSiO₂ y 0.99 g de NTC en 200 ml de isopropanol. Posteriormente se sometió la mezcla a una agitación magnética durante 15 min y se colocará en el ultrasonido por 1 h. Por último, se evaporó el isopropanol a 80°C bajo agitación magnética constante, obteniendo 1 g de nanorefuerzo de SiO₂/NTC con un 1% nSiO₂ y 99% NTC. Este nanorefuerzo obtenido fue analizado por medio de XRD, XFR y SEM.

Una vez hecho esto, se procedió a realizar la adición del nanorefuerzo en las mezclas del mortero. Para esto se realizó la activación mecánica del vidrio, con sus respectivos porcentajes de sustitución de vidrio, y se procedió a filtrar el agua. Al agua obtenida se le añadió el 0.025% de nanorefuerzo y se colocó en el ultrasonido por 1 hora para la dispersión del material y la obtención de la solución activadora. Esta misma fue añadida a la olla y se repitió el proceso para realizar el mortero, recordando añadir el vidrio que fue filtrado, con los diferentes porcentajes. Las mezclas fueron curadas por 3, 7, 28, 90 y 180 días antes de realizar las pruebas de resistencia a compresión y flexión. El proceso se exhibe en la figura 9.

Se llevaron a cabo análisis de IC para las diferentes muestras y se analizaron sus características microestructurales mediante las técnicas XRD, XFR, FTIR y SEM. De igual manera, el agua fue analizada, mediante dispersión de luz dinámica (DLS), sin el vidrio, con el vidrio y agregando el nanorefuerzo.

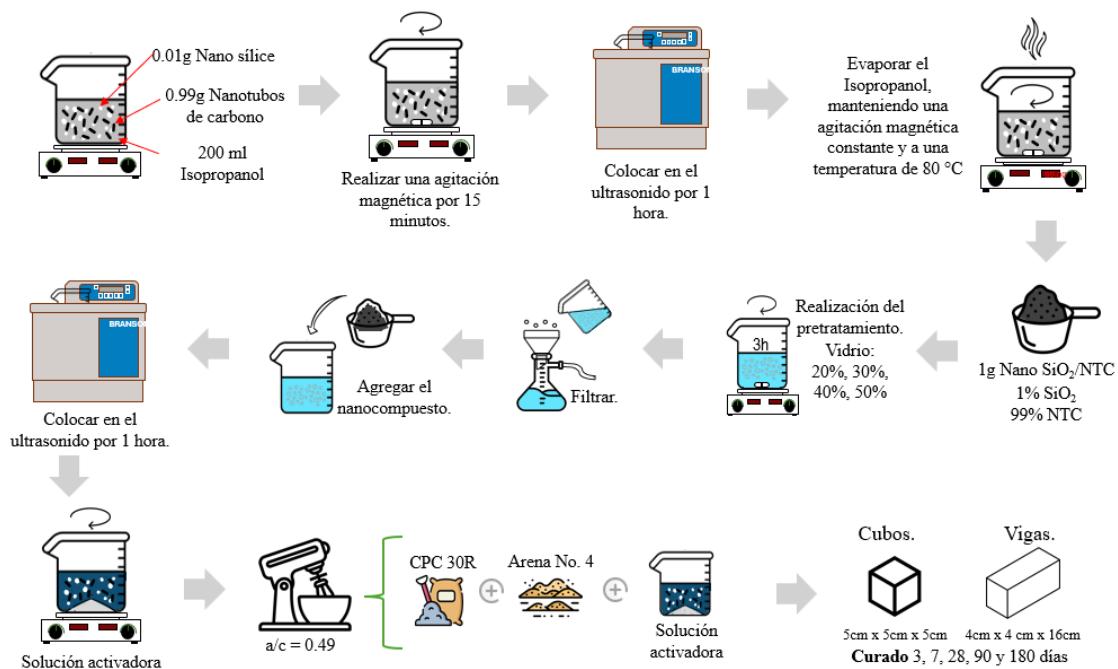


Figura 9. Metodología, etapa 5.

3.3. Técnicas de caracterización, pruebas y equipos.

En este apartado se indican las técnicas de caracterización y los ensayos realizados para el análisis de las propiedades del material. Siendo de esta forma que se describirán las pruebas físicas, químicas y mecánicas, con los respectivos equipos que las obtienen, lo cual permitirá, posteriormente, el correcto análisis de las muestras para determinar la mejor dosificación y la continuación de cada una de las fases del trabajo presente.

3.3.1. Técnicas de caracterización.

Las diversas técnicas de caracterización realizadas a lo largo de la investigación incluyen: XRD, XRF, FTIR, SEM, DTP, IC, ICP, DLS, pH y R³. Estas mismas se describirán a continuación:

- Difracción de rayos X.

Esta prueba nos permitirá identificar las fases cristalinas que se vean presentes en los diversos materiales, así como su zona amorfa, de manera preliminar. De igual manera, con esta prueba se podrá determinar si la adición de vidrio como sustituto genera un comportamiento diferente en las mezclas con respecto a sus compuestos cristalinos, algún desplazamiento de sus picos de difracción o si se genera algún cambio en sus fases. El equipo utilizado es un difractómetro de rayos X marca Malvern PANalytical Empyrean. Para las muestras se utilizó un rango de 10 a 80 y un tamaño de paso de 0.02.

Junto a este equipo, se utilizó el software HighScore Plus para la identificación de las fases cristalinas.

- Fluorescencia de rayos X.

La prueba XRF permite obtener los parámetros de cuantificación de diversos compuestos a base de óxidos que se encuentren presentes en la materia analizada. Esta prueba será utilizada dentro de la primera etapa para poder establecer la cuantificación elemental de las materias primas utilizadas, así como en la última etapa para establecer cambios entre las mismas, lo cual permitirá, posteriormente, tener una idea de lo que se podría observar en el difractograma XRD. El equipo de XRF utilizado es de la marca PANalytical

Epsilon 3-XL, funcionado en una atmósfera inerte con nitrógeno para evitar la contaminación de las muestras.

- Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.

La técnica FTIR permitirá analizar las materias primas y las pastas del cemento híbrido, lo cual permitirá identificar diversos enlaces químicos, inorgánicos u orgánicos, mediante un espectro de absorción infrarroja que permite obtener los grupos funcionales y, de la misma forma que con el XRD, se compararán para analizar cualquier cambio en sus productos de hidratación.

El equipo utilizado es un espectrofotómetro infrarrojo por transformado de Fourier marca Shimadzu modelo IRTtracer-100.

- Microscopía electrónica de barrido.

El SEM será utilizado para conocer la morfología y elementos de los materiales de partida. Posteriormente será utilizado para determinar la buena incorporación del vidrio en la matriz del mortero. El equipo utilizado es un microscopio electrónico de barrido de la marca JEOL JSM-6510LV con electrones secundarios a 20kV en diferentes aumentos, utilizando magnitudes de x30, x50, x100, x500, x1000 y x2000. Mientras, para los nanomateriales, se utilizaron magnitudes de x7500, x20000, x30000, x50000 y x100000.

- Análisis de distribución de tamaño de partículas.

La técnica permitirá el análisis preliminar de la distribución de partículas de los materiales de partida, lo cual permitirá la comparación entre el cemento y el vidrio. Esto permitirá determinar si el vidrio cuenta con tamaños de partícula similares al cemento y, de igual manera, se obtendrán los tamaños que, según la literatura obtenida, muestran una alta reactividad y demuestran un potencial

como material sustituto. Para esta técnica se utilizará un Microtrac S3500 Particle Size Analyzer.

- Calorimetría isotérmica.

La técnica IC se evaluará en las últimas cuatro etapas, en este caso para las pastas de cada una de las mezclas, debido al interés en la caracterización del vidrio y el nanomaterial. Esta prueba permitirá analizar el comportamientos de las mezclas ante el calor en los primeros días, lo cual permitirá analizar su cinética de hidratación y así poder comparar las mezclas contra una pasta tradicional. Se utiliza un calorímetro Calmetrix I-Cal 4000 HPC (“High Precision Calorimeter”) en un análisis de 72 horas a una temperatura base de 23°C.

- Espectrometría de plasma con acoplamiento inductivo.

La prueba ICP permitirá determinar la presencia de elementos en las muestras. En este caso, la prueba es realizada en la etapa 2, para poder determinar cómo es que la activación mecánica del vidrio podría afectar a la dispersión de los iones en agua. Las muestras fueron analizadas en estado líquido.

- Dispersión de luz dinámica.

Los datos obtenidos por el DLS serán de gran importancia para determinar el tamaño de partículas y distribución de estas, esto enfocándolo en la dispersión para los nanomateriales. La técnica permitirá determinar si la solución activadora por realizar (agitación del vidrio en agua) será una buena alternativa a los dispersantes. El equipo utilizado para esta prueba es el Zetasizer de la marca Malvern PANalytical.

- Potencial de hidrógeno.

El análisis del pH será realizado en la etapa 2, buscando determinar cómo es que esta propiedad se ve afectada con respecto a la cantidad de horas que se le dan al vidrio como activación, esto con el propósito de determinar si se está obteniendo un ambiente alcalino. Este resultado, posteriormente se podrá analizar junto con los resultados obtenidos del ICP.

- Reactividad del material puzolánico.

La presente técnica será realizada en la etapa 2 y 4, buscando analizar cómo es que el vidrio, con sus diferentes etapas de activación, podrá reaccionar con la portlandita en condiciones controladas. En este caso, también será un factor importante para determinar si el vidrio utilizado tiene actividad puzolánica o si es que solo actúa como relleno. Para esta prueba, se analizaron los dos métodos, para el método A, siendo enfocado en la liberación del calor, se utilizó un calorímetro Calmetrix I-Cal 4000 HPC (“High Precision Calorimeter”) en un análisis de 7 días a una temperatura base de 40°C.

3.3.2. Otras pruebas.

Otras pruebas por realizar en esta investigación son pruebas físicas, químicas y mecánicas como la molienda, resistencia a compresión y flexión.

- Molienda.

La molienda se realiza en la etapa 1, en este caso, para el vidrio, esto con el fin de obtener una buena distribución y tamaño de partículas similares al CP. Para esto se utilizó una trituradora de bolas, permitiendo que se obtengan

tamaños de aproximadamente 30 mm, posterior a esto el vidrio se colocó en una pulverizadora de la marca BICO INC para obtener tamaños cercanos a 5 mm y, por último, un molino de bolas, con bolas de alúmina, para obtener tamaños cercanos a las 70 μm . Para el molino de bolas se realizaron dos cargas, de aproximadamente, 8 kg cada una.

- Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión será uno de los parámetros más importantes dentro del trabajo, siendo igual de importante en el ámbito de la construcción, esta nos permitirá establecer el uso y aplicaciones que se le podrían atribuir al mortero. Esta propiedad será una de las principales para determinar la dosificación correcta del mortero. Para la realización de esta se utiliza la máquina de ensayo a compresión marca Instron modelo 600DX con una velocidad de carga de 90 kg/s.

- Resistencia a flexión.

De igual forma que la resistencia a compresión, la resistencia a flexión será una de las propiedades que permitirán definir una correcta dosificación del mortero. En este caso, la flexión será analizada para determinar cómo se está promoviendo la incorporación del vidrio en la matriz cementante. Para esto, las pruebas realizadas son hechas en la máquina de ensayo de marca Instron modelo 600DX, con el accesorio correspondiente, siendo este la prueba a tres puntos, con una velocidad de 1mm/s.

- Reacción álcali-sílice.

Esta prueba, dictada por la normativa ASTM C1567 [50] la cual describe un método acelerado para evaluar la RAS de morteros. Esta prueba consiste en

elaborar barras y, después del curado, estas se sumergen en una solución de NaOH a 80 °C durante 14 días. La expansión lineal de las barras se mide periódicamente y, si excede el 0.10% a los 14 días, se considera que el material agregado es reactivo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en la presente investigación, en este caso, cada uno de los resultados será presentado dentro de sus etapas experimentales, siguiendo el orden propuesto en el capítulo anterior.

4.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.

El primer paso por realizar fue la molienda del vidrio, lo cual le permitió aumentar su reactividad y, al mismo tiempo, el que tenga partículas más finas le permite incorporarse mejor con la matriz cementante al tener partículas similares al de cemento Portland. Como se mencionó en el apartado de metodología experimental, se realizó un análisis DTP para analizar el tamaño de partícula del CPC y del vidrio determinando que el D50 era de 15.98 μm y 55.79 μm , respectivamente, tal como se muestra en la figura 10.

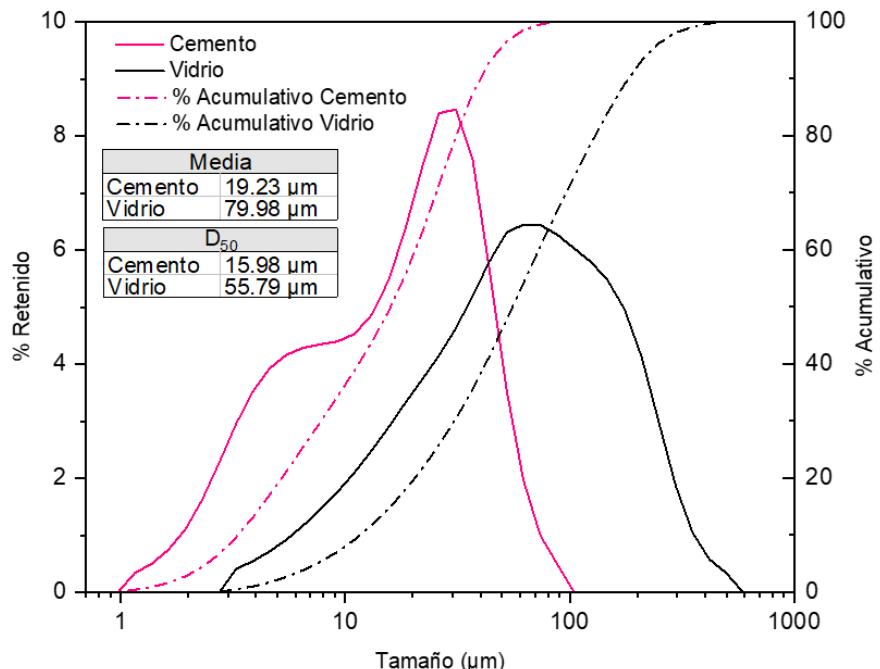


Figura 10. Análisis DTP de materias primas del vidrio y cemento.

En esta figura se observa que el tamaño de las partículas varió entre los materiales, siendo que el tamaño del VSC se presenta entre los rangos de 3 a 600 μm , con una media de 79.98 μm ; mientras que el CP se encuentra en un rango de 1 a 100 μm con una media de 19.23 μm , demostrando que el tamaño de partículas menor es del CP.

Siguiendo el proceso de caracterización, se realizó el análisis XRF para el vidrio y CP, con el fin de obtener la composición de ambos materiales. Considerando esto, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla III, donde se muestran las cuantificaciones de cada compuesto elemental en óxidos.

Tabla III. Composición química del cemento Portland y el vidrio.

Compuesto	CPC 30R (%)	ASTM C150 (%)	V (%p)	ISO-12775 (%p)
SiO ₂	10.572	N/A	72.792	70 – 75
Al ₂ O ₃	2.87	<6.0	2.992	0.5 – 2.5
Fe ₂ O ₃	2.113	<6.0	0.05223	—
SO ₃	4.832	<3.0	0.338	—
CaO	76.815	N/A	12.029	10 – 15
MgO	0.459	<6.0	—	
TiO ₂	0.231	N/A	0.02023	—
Ag ₂ O	0.136	N/A	0.07915	—
K ₂ O	1.174	N/A	0.301	12 – 16
Na ₂ O	—	—	10.564	

Con estos resultados se demuestra que los materiales de partida cumplen con la composición adecuada para ser utilizados según lo establecido en la ASTM C150[51], para cementos, y la ISO-12775[46], para vidrios; siendo que los principales componentes de los materiales entran en los rangos de cada una de estas. El vidrio tiene los porcentajes marcados para que cumpla con su composición de ser un VSC y el CP no excede los rangos que permite la normativa para su utilización.

Otra caracterización realizada a las materias primas fue el XRD para obtener las fases cristalinas de los materiales y, de igual manera, para observar visualmente la amorficidad que presenten los materiales. En la figura 11 se observan los resultados para cada uno de los materiales y la comparación entre ambos.

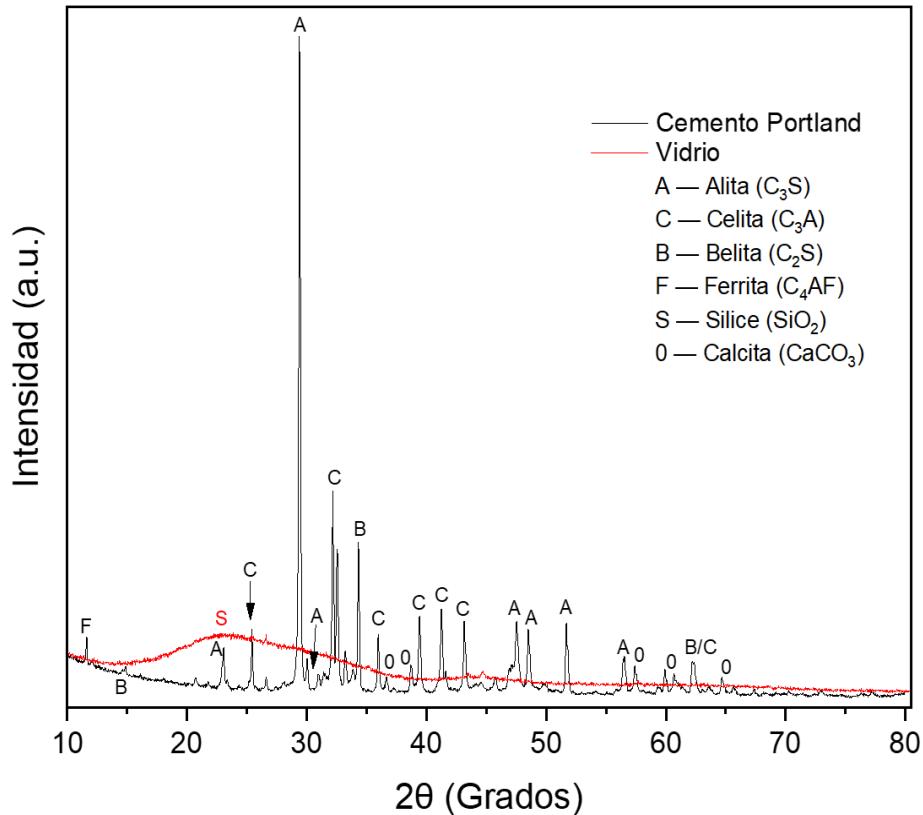


Figura 11. Difractograma de rayos X del cemento Portland y el vidrio.

En la figura se muestra el difractograma del CP donde se identificaron las fases C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF y CaCO₃ las cuales corresponden a las esperadas para este tipo de material. El CP y sus fases son en gran medida cristalinas con pequeños contenidos de amorficidad [52] al tiempo que se muestra la presencia de SiO₂ para el material del vidrio, determinando que tiene, de igual forma, una naturaleza amorfa, ya que no es posible identificar ningún pico.

Asimismo, con los análisis SEM a los materiales de partida se puede observar la morfología de cada uno de estos. El análisis de la morfología es importante debido a que en la siguiente etapa el vidrio podría llegar a tener algún cambio en esta propiedad por la activación por realizar. Tal como se observa en la figura 12, en el caso del CPC, siendo el inciso a, se pueden observar las formas irregulares de las partículas que lo componen y, de igual manera, se observa la uniformidad entre sus tamaños. Por otro lado, en el inciso b, correspondiente al vidrio, se puede observar la morfología angular de las partículas y la diferencia de tamaños que se pueden encontrar en cada una de estas, siendo que se demuestra lo mencionado en el análisis DTP, que a pesar de la molienda se mantienen partículas ligeramente grandes.

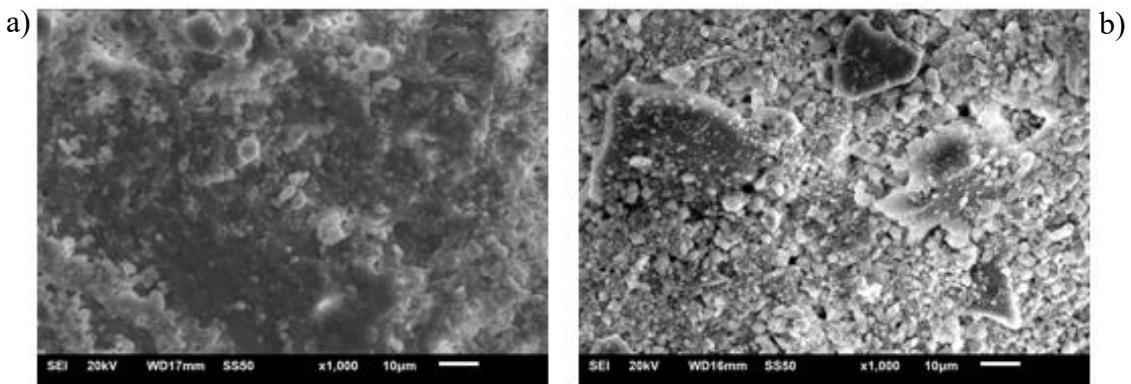


Figura 12. SEM de las materias primas: a) CP y b) Vidrio

4.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.

Con el objetivo de establecer el tiempo óptimo para la activación mecánica del vidrio, se llevó a cabo un conjunto de análisis al agua con vidrio, en este caso para la etapa correspondiente, se enfocó principalmente en determinar como la activación mecánica puede modificar el material y como esto podría mejorar sus propiedades.

El pH es un parámetro clave para poder entender el ambiente alcalino químico interno de un material cementante. Se puede obtener una solución con alto pH al tener la presencia de iones alcalinos, tales como el potasio y sodio [53].

Las reacciones de los vidrios en soluciones acuosas se describen, generalmente, mediante dos mecanismos principales; el intercambio de iones alcalinos en la superficie con H^+ y H_3O^+ y la disolución de la red mediante el ataque de los iones OH a la estructura de sílice. Por lo tanto, las reacciones están controladas por el pH de las soluciones [54]. Considerando esto, se realizó un análisis químico de las muestras de vidrio con diferentes tiempos de activación mecánica, los resultados se presentan en la figura 13.

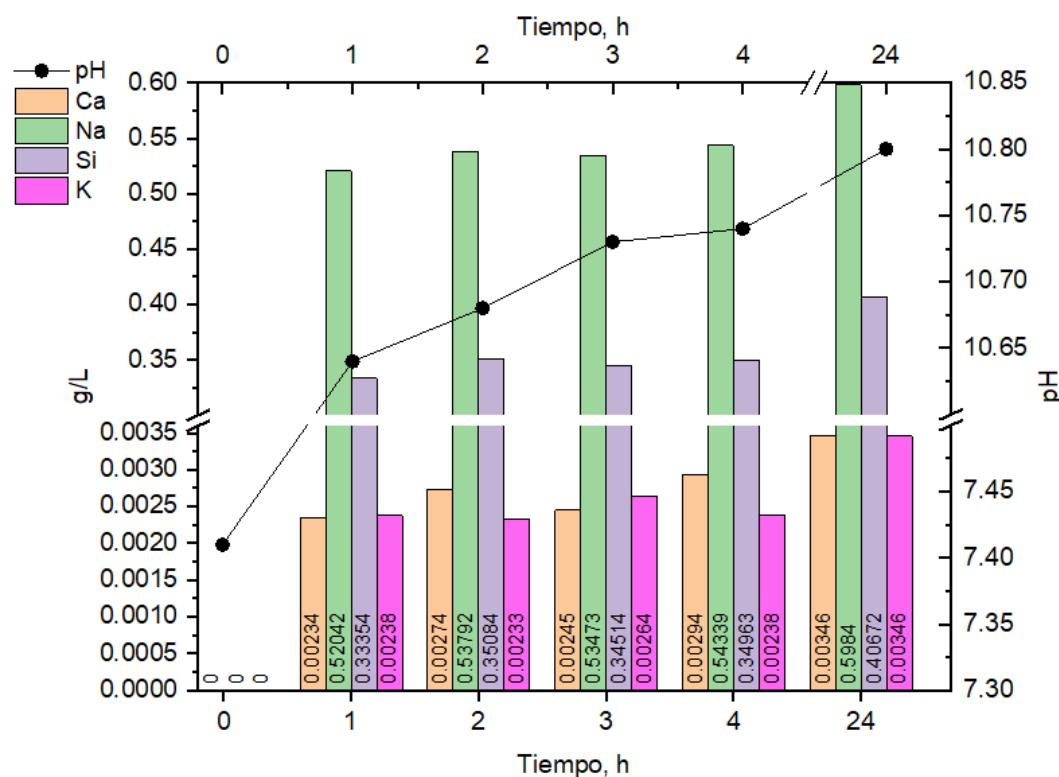


Figura 13. Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: ICP y pH del vidrio.

En la figura 13 se observa el incremento del pH con respecto al tiempo, alcanzando un valor máximo de 10.8 a las 24 h de activación del vidrio; al mismo tiempo, se pueden observar las concentraciones de Ca, Na, Si y K mostrando un ligero aumento con respecto al tiempo de activación, siendo el de 24 h el valor más alto, aumentando un 15% con respecto al tiempo inicial. Generando una liberación de iones Na cuando el vidrio tiene contacto con el agua, y al promover una activación mecánica del material, esta liberación de iones demuestra un ligero incremento, tal como lo reportaron Kuijiao y colaboradores [25].

La FTIR se ha aplicado ampliamente a la interpretación de las modificaciones estructurales que se pueden producir en los vidrios al someterse a tratamientos térmicos. Los cambios de temperatura afectan a la estructura cristalina de los vidrios, por lo tanto, el desplazamiento de los picos principales del vidrio en FTIR puede ser utilizado para evaluar cambios en diversas propiedades como la densidad, coeficiente térmico, expansión, durabilidad y propiedades mecánicas [55].

El espectro FTIR de la sílice muestra sus picos representativos a aproximadamente a los 1100, 800 y 470 cm⁻¹ correspondiente al grupo funcional Si-O-Si. La banda de 1100 cm⁻¹ ha sido la más estudiada de todas, siendo esta correlacionada a las modificaciones en la estructura del vidrio [55]. Se realizó este análisis con el fin de evaluar los posibles cambios inducidos por la activación mecánica del vidrio, obteniendo los resultados mostrados en la figura 14.

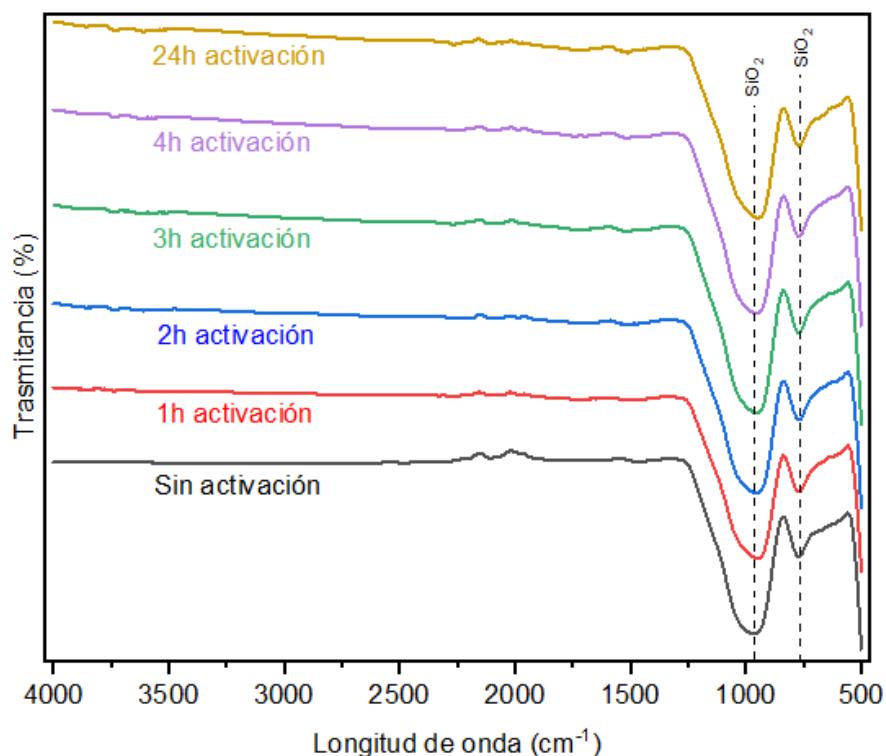


Figura 14. Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: FTIR.

De acuerdo con la literatura, la presencia de iones metálicos puede generar deformaciones en la red vítrea, lo cual se manifiesta como un desplazamiento de la banda hacia menores números de onda [55]. Estos espectros demuestran que la activación mecánica no genera un cambio significativo en la estructura del vidrio. En este caso, se mantienen iguales en todas las horas analizadas. Se representan las bandas características del grupo funcional Si-O-Si en 954 y 760 cm⁻¹.

El efecto del polvo de vidrio en las propiedades de los morteros depende principalmente de la finura y es más pronunciado en edades de curado mayores. Un menor tamaño de partícula incrementa significativamente el área superficial específica, lo cual potencia la reactividad puzolánica y, por consiguiente, mejora la resistencia a compresión al facilitar la formación de productos de hidratación tales como el gel CSH. [56].

Considerando la posibilidad de que el proceso de activación mecánica podría haber ocasionado modificaciones en el tamaño o morfología del material, se realizaron análisis DTP y SEM a las diferentes muestras, tal como se presenta en la figura 15.

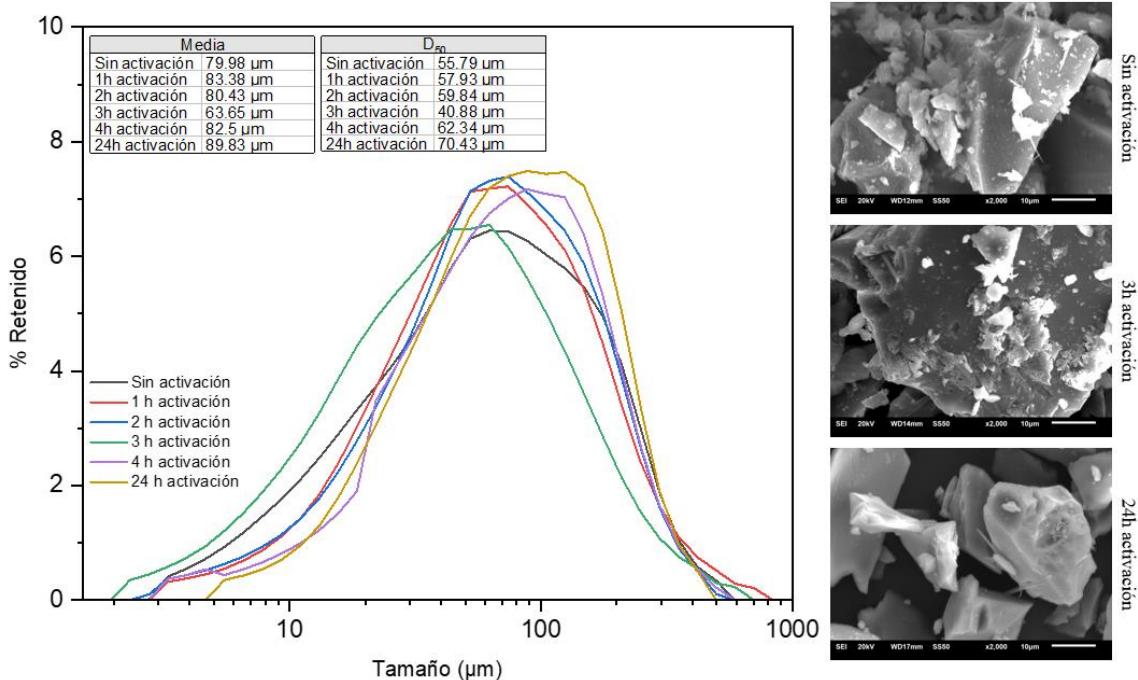


Figura 15. Análisis DTP y SEM posterior a la activación mecánica del vidrio.

El tamaño de partícula del material de la muestra sin activación mecánica tiene un tamaño de partículas grandes, siendo que cuenta con un rango de entre 2 a 600 μm. Al compararlo con las muestras con activación se observa una tendencia más estrecha de las partículas, siendo que los tamaños mayores tienen menos presencia y los tamaños menores incrementan. La activación genera impactos entre el polvo de vidrio provocando una

ruptura ligera de los enlaces y la formación de una nueva superficie las cuales permiten que las partículas se aglomeren entre sí [57].

Durante la activación en agua, el vidrio inicial es disuelto parcialmente (disolución de iones Na^+ , H_3O^+ y SiO_2) lo que promueve la formación superficial y generación de puentes entre las partículas finas. En las primeras 3 h de activación, el tamaño promedio del polvo disminuye a 41 μm , indicando una ruptura entre las partículas; sin embargo, al prolongar la activación mecánica en 4 y 24 el tamaño vuelva a incrementar hasta 71 μm , evidenciando la aglomeración de las partículas. Esto confirma la necesidad de limitar tiempos de activación para evitar la pérdida de superficie reactiva.

A su vez, en la figura 15, la morfología del material no demuestra un cambio significativo, se mantienen las formas angulares del vidrio y sus diversos tamaños, demostrando que, si bien los tamaños de las muestras tienen un cambio en sus tamaños, esto no afecta su estructura.

Asimismo, se realizó un análisis mediante la prueba R^3 para determinar su reactividad, en este caso, utilizando el método B donde se obtienen los resultados de la figura 17.

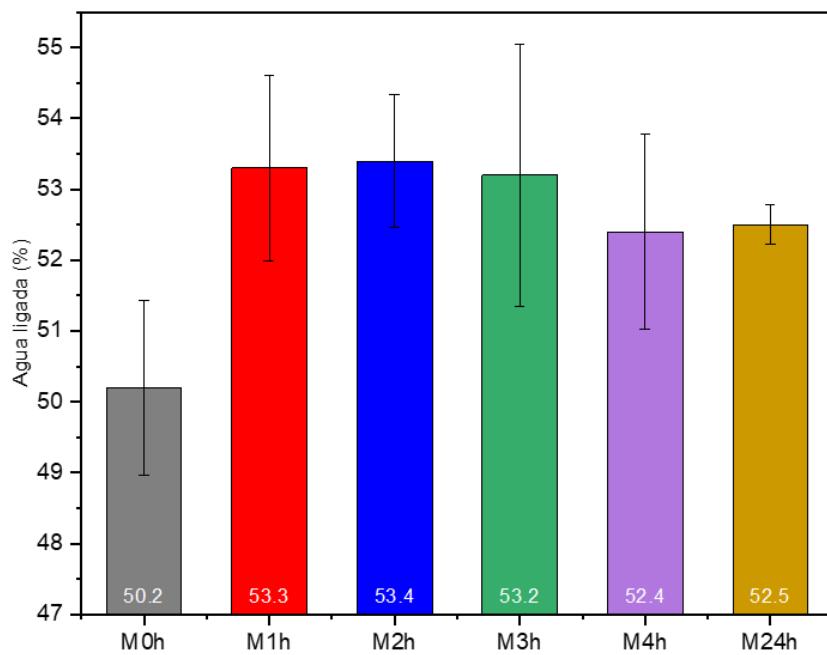


Figura 16. Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: R^3 .

Se evidenció, de esta forma, que el vidrio presenta una reactividad puzolánica. Las muestras M1h y M2h exhiben una reactividad temprana, mientras que, a partir de la muestra M3h la reactividad baja y tiende a estabilizarse. Por lo tanto, la activación mecánica al vidrio genera una reactividad inicial acelerada, seguida de una rápida estabilización, lo cual indica que a después de las 4h de activación no va existir un cambio significativo a comparación de las primeras horas de activación.

4.3. Etapa 3. Morteros con 20% de sustitución.

La etapa 3 constituye una continuidad de la etapa 2 donde se enfoca en el análisis integral de los morteros, que incluye la caracterización microestructural mediante SEM,

el estudio del comportamiento colorimétrico y la evaluación de su desempeño mecánico, esto en función de las diferentes horas de activación mecánica por comparar.

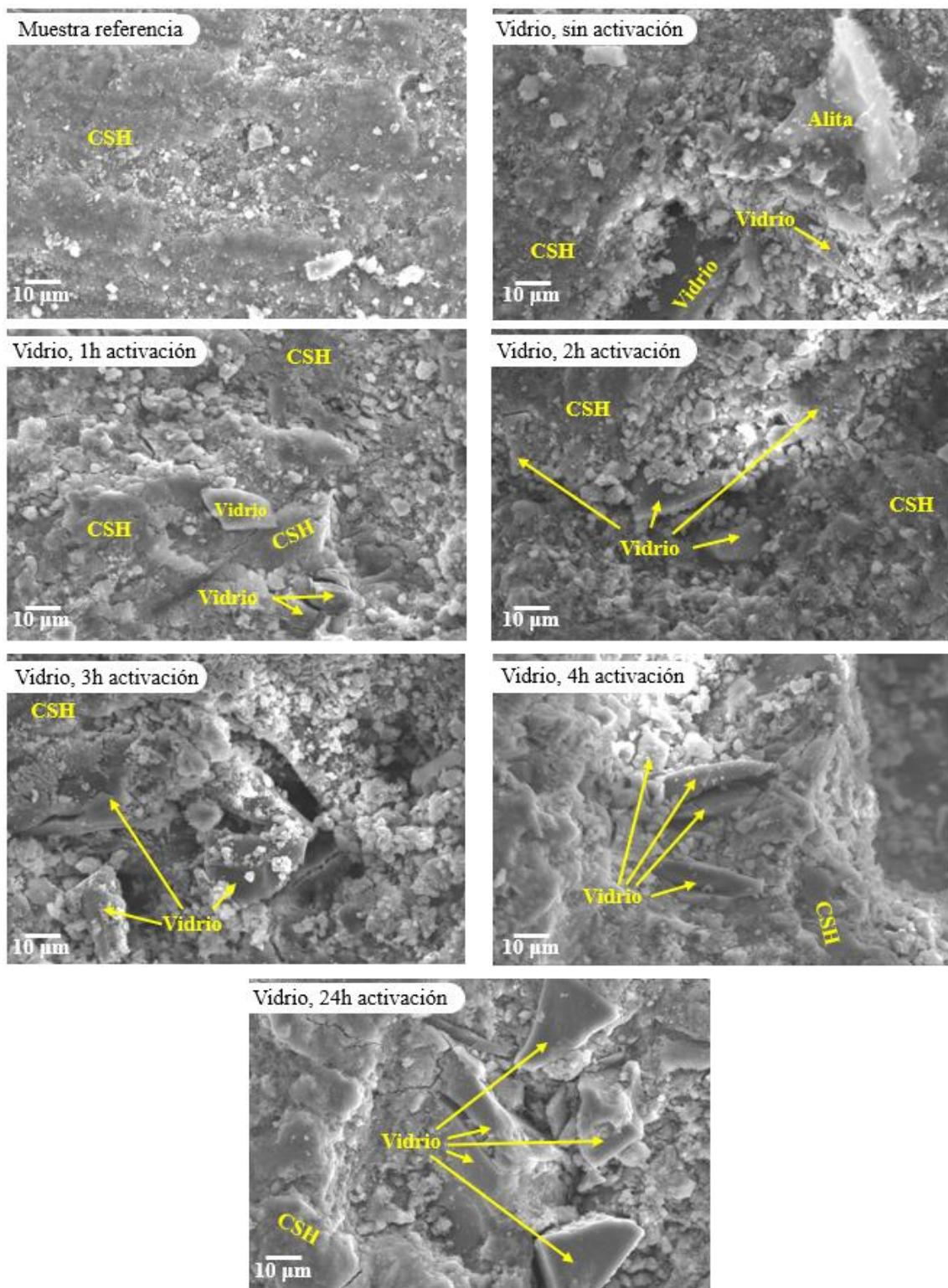


Figura 17. SEM de morteros, muestras con activación mecánica.

En la figura 17 se presentan las micrografías SEM correspondientes a los morteros de cemento y morteros con sustitución de vidrio al 20%, evaluadas en diferentes tiempos de activación mecánica. La muestra de referencia exhibe, principalmente, la presencia del gel CSH de morfología densa y compacta.

En contraste, la muestra con vidrio agregado, sin activación, presenta algunas partículas de vidrio las cuales no están reaccionando, de igual manera se observa una fase de alita y productos CSH lo cual indica que, en ausencia de activación mecánica, el vidrio no está participando en las reacciones de hidratación. Con el avance del tiempo de activación mecánica se observa un incremento en la interacción entre las partículas de vidrio y la matriz, esto evidenciado por la aparición de CSH alrededor de los fragmentos vítreos.

Esto evidencia que, tras un tiempo suficiente de activación mecánica, el vidrio participa activamente en la formación de fases cementantes, reforzando la hipótesis de su potencial como material suplementario en la matriz.

Por otro lado, se realizó una calorimetría isotérmica para las muestras de vidrio con diferentes horas de activación. Fueron considerados tres días para dicha prueba y los resultados obtenidos se presentan en la figura 18.

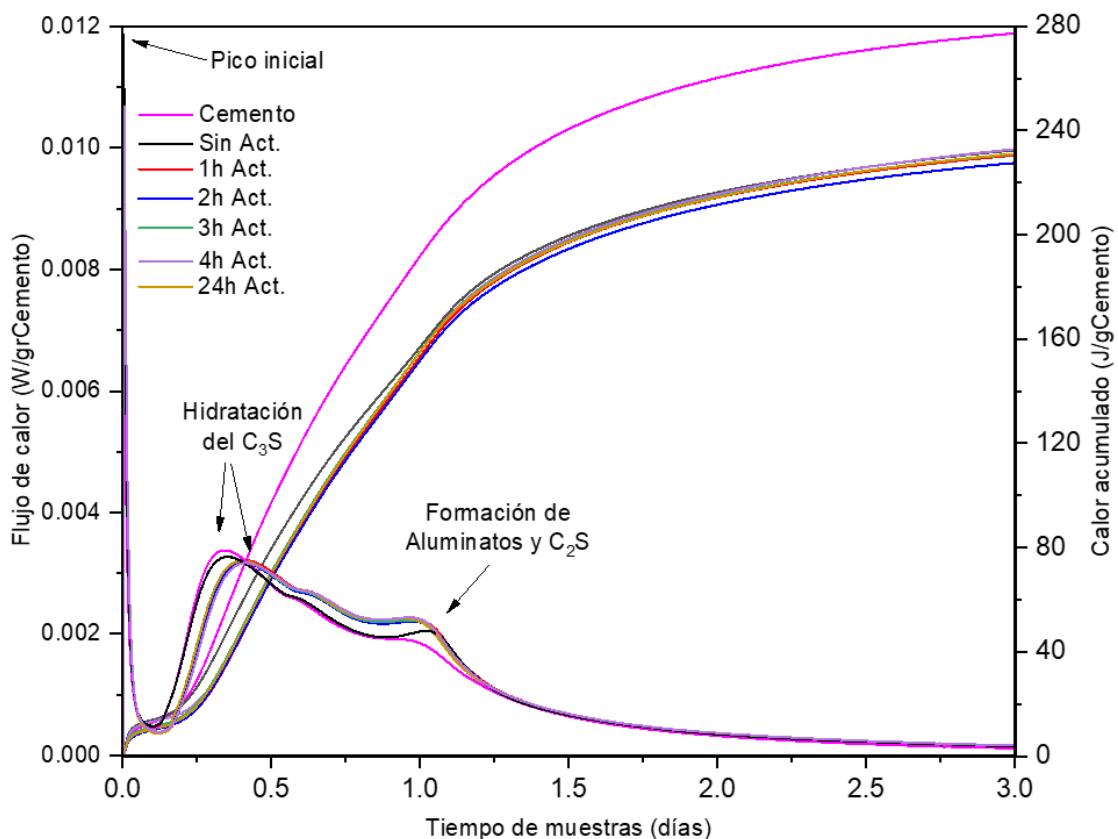


Figura 18. Calorimetría de morteros con vidrio con activación mecánica a diferentes tiempos; Flujo de calor y Calor acumulado.

En la figura 18, analizando el flujo de calor, se observan los picos característicos de la pasta de cemento junto con las diferencias al utilizar el vidrio como sustituto. El mayor cambio se comienza a notar en la etapa 3, el periodo de aceleración, la muestra sin activación presenta el pico más bajo y las muestras con activación tienen picos mayores, lo que indica que existe una mejor reacción de las matrices.

El calor acumulado, por otro lado, expone que el efecto de la activación al vidrio afecta la reacción de hidratación y se puede observar la disminución de la liberación de calor con respecto a un mortero de CP, siendo que se puede observar una ligera disminución cuando

se sustituye el vidrio. A su vez, se puede observar que el mortero con un aumento de calor en los últimos días de análisis es el cual cuenta con 4h de activación, teniendo un ligero aumento con respecto al mortero con vidrio agregado como mezcla física y sin activación.

Las curvas con mayor liberación de calor experimentan una hidratación más intensa, dando a entender que se podría tener una reactividad mayor por parte del vidrio, esto siendo correspondiente con los tamaños de partícula, que, según la literatura, mientras menor sea el tamaño, más reactividad se tendrá.

Completando la caracterización de los morteros, se realizaron pruebas a compresión y flexión, según la normativa ASTM C109. En la figura 19 se muestran los resultados obtenidos de la compresión de las muestras.

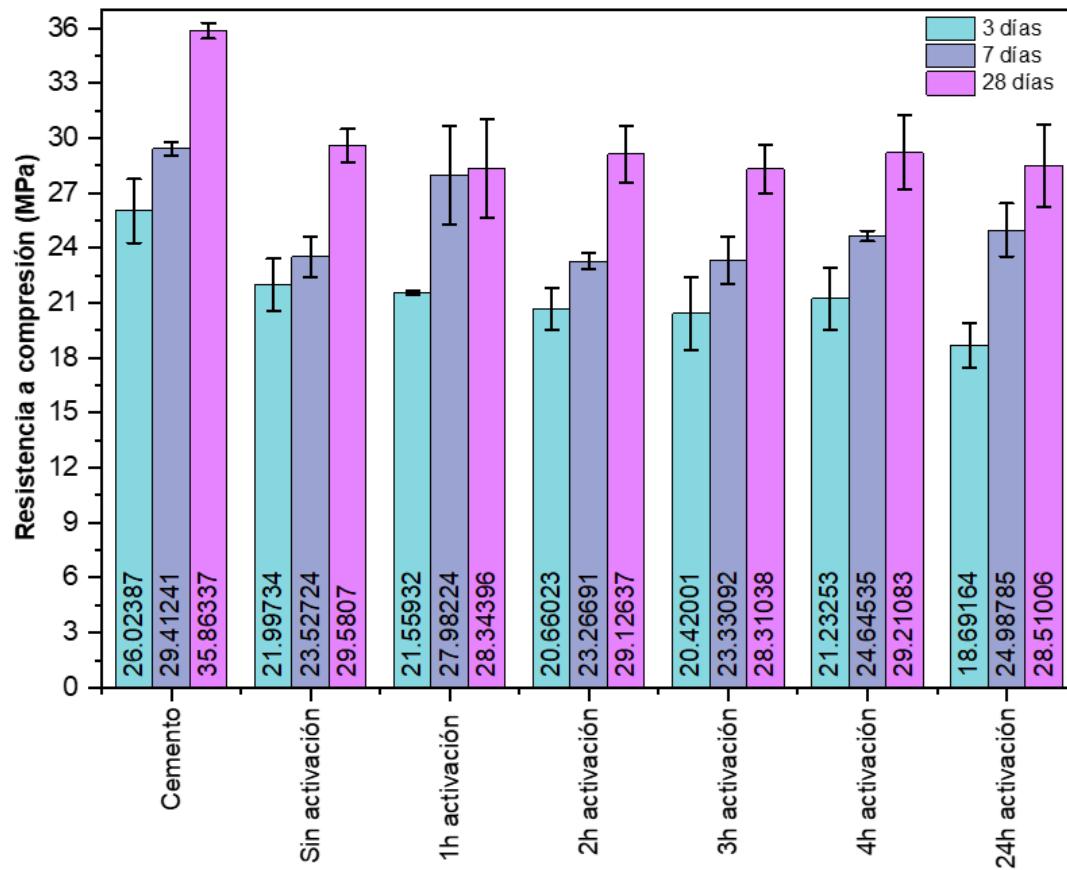


Figura 19. Resistencia a compresión de muestras con diferentes tiempos de activación.

La figura presenta los valores de resistencia a compresión a 3, 7 y 28 días de curado, considerando la muestra de referencia el de cemento. La muestra referencia presenta el mayor desempeño mecánico a 28 días, obteniendo 35 MPa. En el caso de los morteros con vidrio, la activación mecánica influye de manera significativa, se observa un desarrollo inicial lento en los primeros días de curado, sin embargo, a los 28 días se obtienen resistencias mayores, teniendo la muestra de 4h de activación con la mayor resistencia, siendo de 29 MPa. Estos resultados demuestran que el vidrio, al tener una activación mecánica, termina participando en las reacciones puzolánicas y contribuye a las ganancias de resistencia a edades mayores.

De igual manera, se observa que los morteros con activación demuestran que el proceso mejora la reactividad del vidrio. No obstante, un tiempo mayor a 24h de activación no genera un beneficio adicional significativo, ya que se obtiene una resistencia de 28.52 MPa, siendo un valor comparable al de 2h y 3h.

Por otro lado, en la figura 20 se exhiben los resultados obtenidos de la flexión de las muestras.

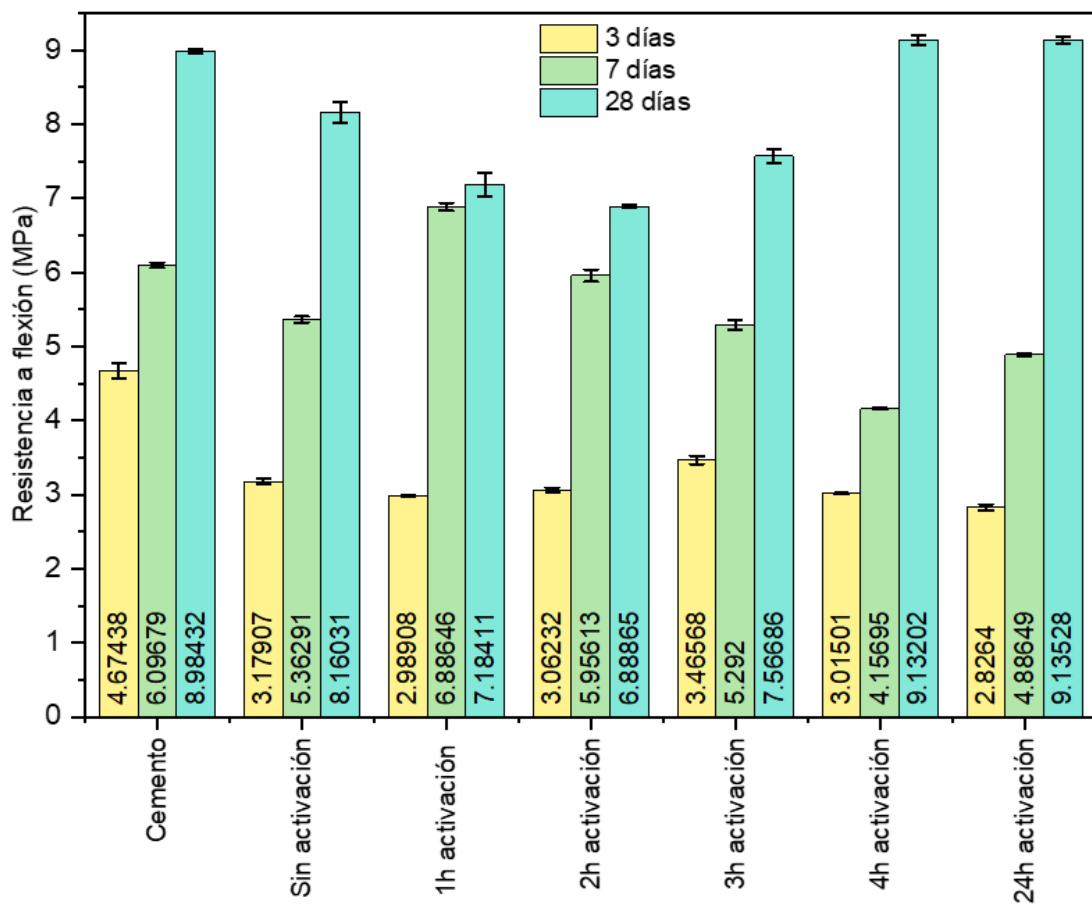


Figura 20. Resistencia a flexión de muestras con diferentes tiempos de activación.

Esta figura expone la evolución de la resistencia a flexión de los morteros elaborados.

La muestra referencia obtiene un valor del 8.98 MPa. Por otro lado, los morteros con vidrio muestran una tendencia similar a los valores de compresión; las muestras de 4h y 24h muestran una resistencia similar a la muestra referencia. Estos resultados sugieren que el vidrio participa progresivamente en la formación de las fases, mejorando la incorporación de este en la matriz cementante.

La resistencia a flexión de muestras con vidrio reciclado, generalmente, tiende a mostrar tendencias similares a las vistas en resistencias a compresión, la mayoría de las

investigación con respecto a esto demuestran que la resistencia varía dependiendo del tipo, tamaño y la fuente de vidrio utilizada [58]. El vidrio, por su sílice amorfa, reacciona con el Ca(OH)₂ liberado en la hidratación y, posteriormente, forma geles CSH. Así mismo, este material puede reducir la porosidad y aumentar la homogeneidad, lo cual se demuestra al obtener valores altos de resistencia.

4.4. Etapa 4. Morteros con sustituciones mayores: 30, 40 y 50%.

Una vez analizados los diferentes tiempos de activación, se determinó que el tiempo de 3 horas presenta los mejores resultados. Esto basado en los resultados obtenidos, donde dicho tiempo de activación obtuvo el menor tamaño de partícula (63.65 μ m), una buena incorporación del material en la matriz, y buenas resistencias mecánicas.

En cuanto a las propiedades mecánicas, se lograron resistencias similares en los diferentes tiempos de activación, obteniendo una resistencia máxima de 29 MPa para compresión y un rango de 6.8 a 9.1 MPa para flexión. Los mejores resultados se obtuvieron de los tiempos 2, 3 y 4 horas, siendo que cualquiera de estos valores tiene un mismo rango de resistencias.

Considerando esto como punto de partida para la siguiente fase, se procedió a trabajar con las sustituciones de CP por vidrio en mayores porcentajes (30, 40 y 50%). De igual forma, a partir de esta fase se comenzó la realización de curados más prolongados, de 90 y 180 días.

De acuerdo con Tognonvi y colaboradores [59] la reacción del vidrio dentro de un sistema cementante continua más allá de los 90 días de curado debido a la baja reactividad

inicial que presentan y a las reacciones puzolánicas. En etapas tempranas, la hidratación será dominada por el CP, produciendo grandes cantidades de Ca(OH)₂, mientras que el vidrio comenzará a disolverse lentamente. Sin embargo, conforme vaya terminando la hidratación del CP, el vidrio pasará a reaccionar gradualmente, generando nuevos geles de CSH.

Por esta razón, aparte del análisis de propiedades mecánicas a estas edades, también se realizaron análisis XRD y FTIR de las diferentes muestras, considerando las muestras de referencia y las de 20% de sustitución para la comparación de estas. En la figuras 21, 22, 23, 24 y 25 se muestran los resultados obtenidos de XRD para cada una de las muestras a 28, 90 y 180 días de curado.

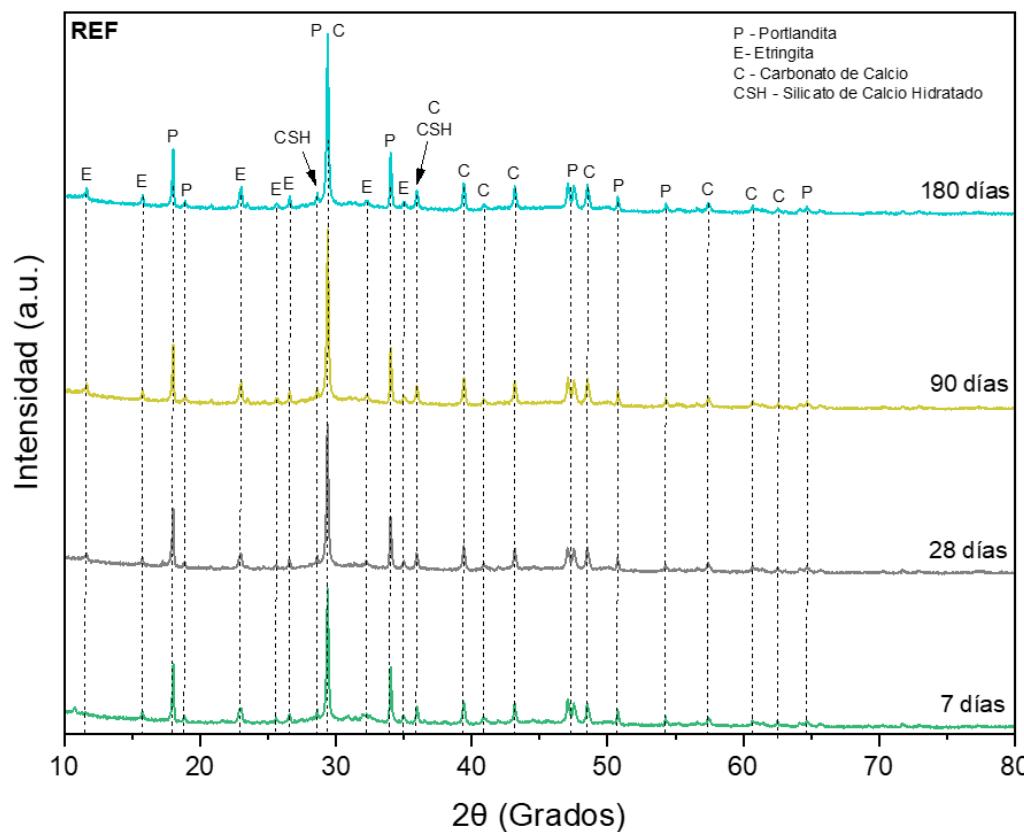


Figura 21. XRD de muestra referencia a 7, 28, 90 y 180 días.

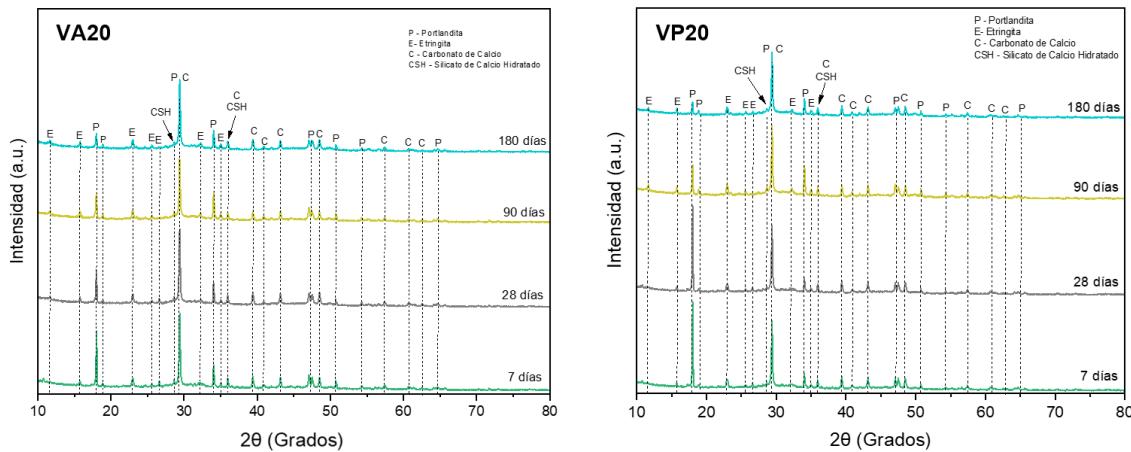


Figura 22. XRD de muestra con 20% de sustitución referencia a 7, 28, 90 y 180 días.

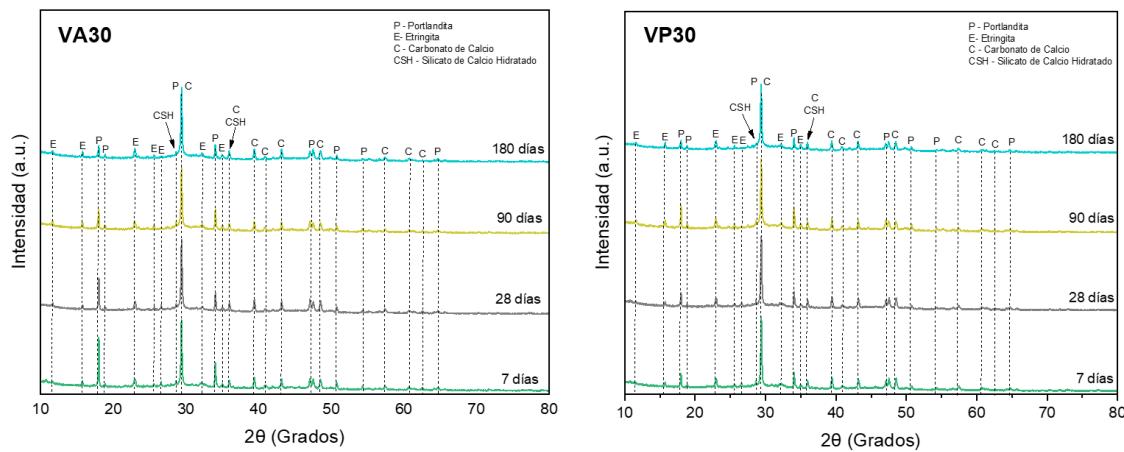


Figura 23. XRD de muestras con 30% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días.

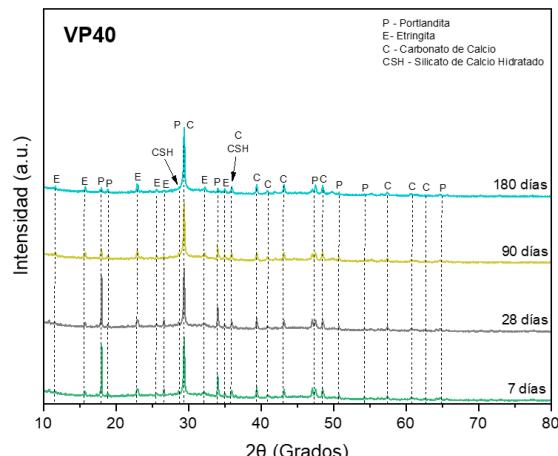
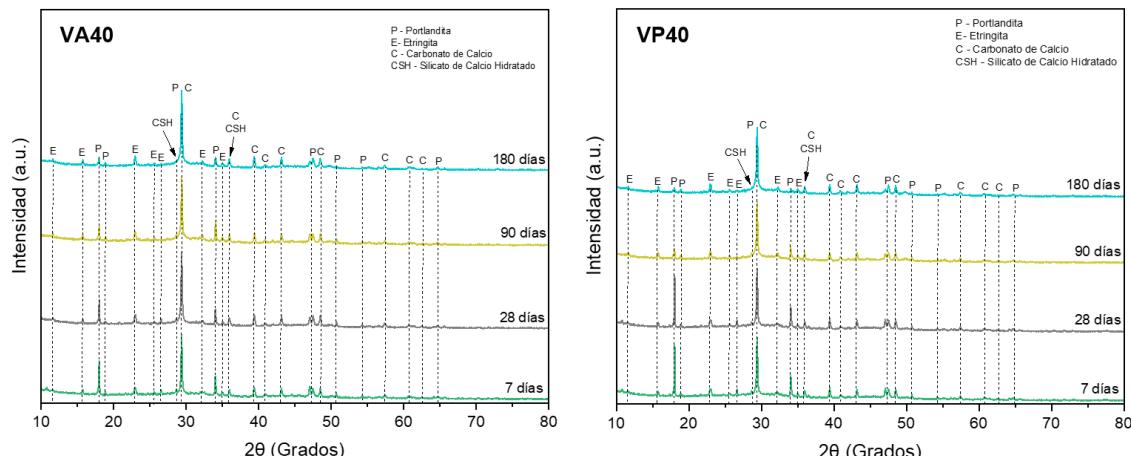


Figura 24. XRD de muestras con 40% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días.

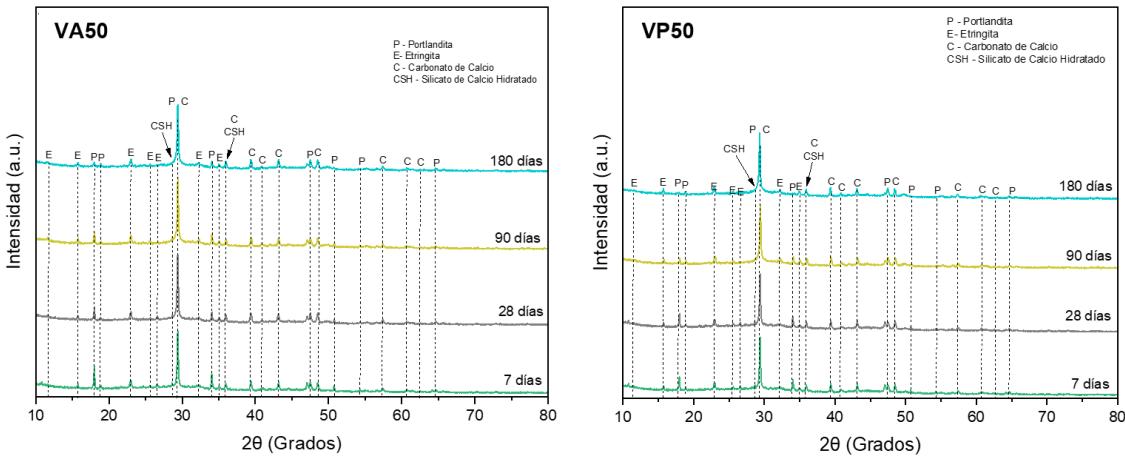


Figura 25. XRD de muestras con 50% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días.

Los difractogramas XRD de las diferentes muestras presentan los picos de difracción característicos de morteros: etringita, portlandita, el gel CSH y la calcita, aunque dependiendo del porcentaje de CP sustituido por vidrio, se logran observar diversas intensidades en los picos.

La naturaleza puzolánica del vidrio favorece el consumo de hidróxido de calcio y silicatos reactivos, lo que podría explicar la menor intensidad de algunos picos cristalinos. La intensidad de los picos de portlandita disminuye con respecto a los tiempos de curado, lo que demuestra la lenta puzolinidad del material. De igual manera, se determina que el uso del vidrio genera un retraso al proceso de hidratación, tal como explican Zhang y colaboradores [60].

Se realizó un análisis FTIR con el fin de evaluar, de igual forma que en la fase 2, los posibles cambios inducidos por la sustitución del CP por el VSC y la activación mecánica propuesta, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 26 y 27

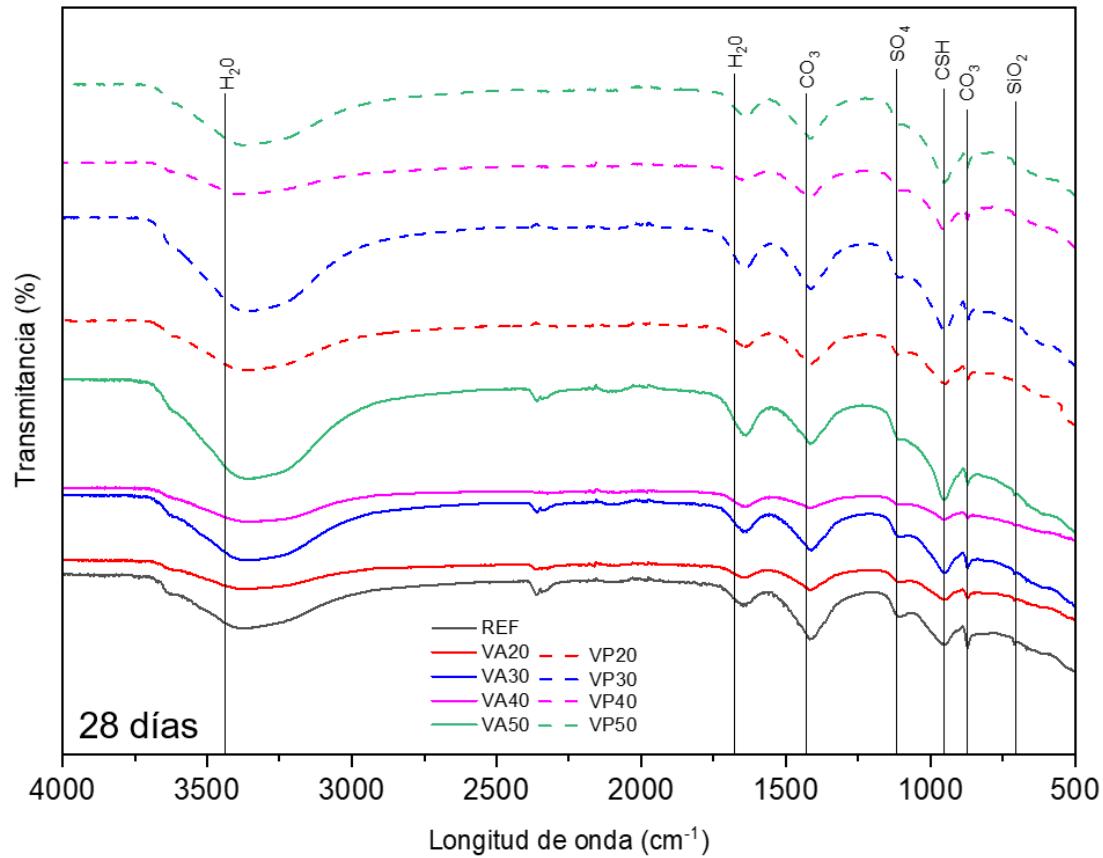


Figura 26. FTIR de muestras VA y VP a 28 días.

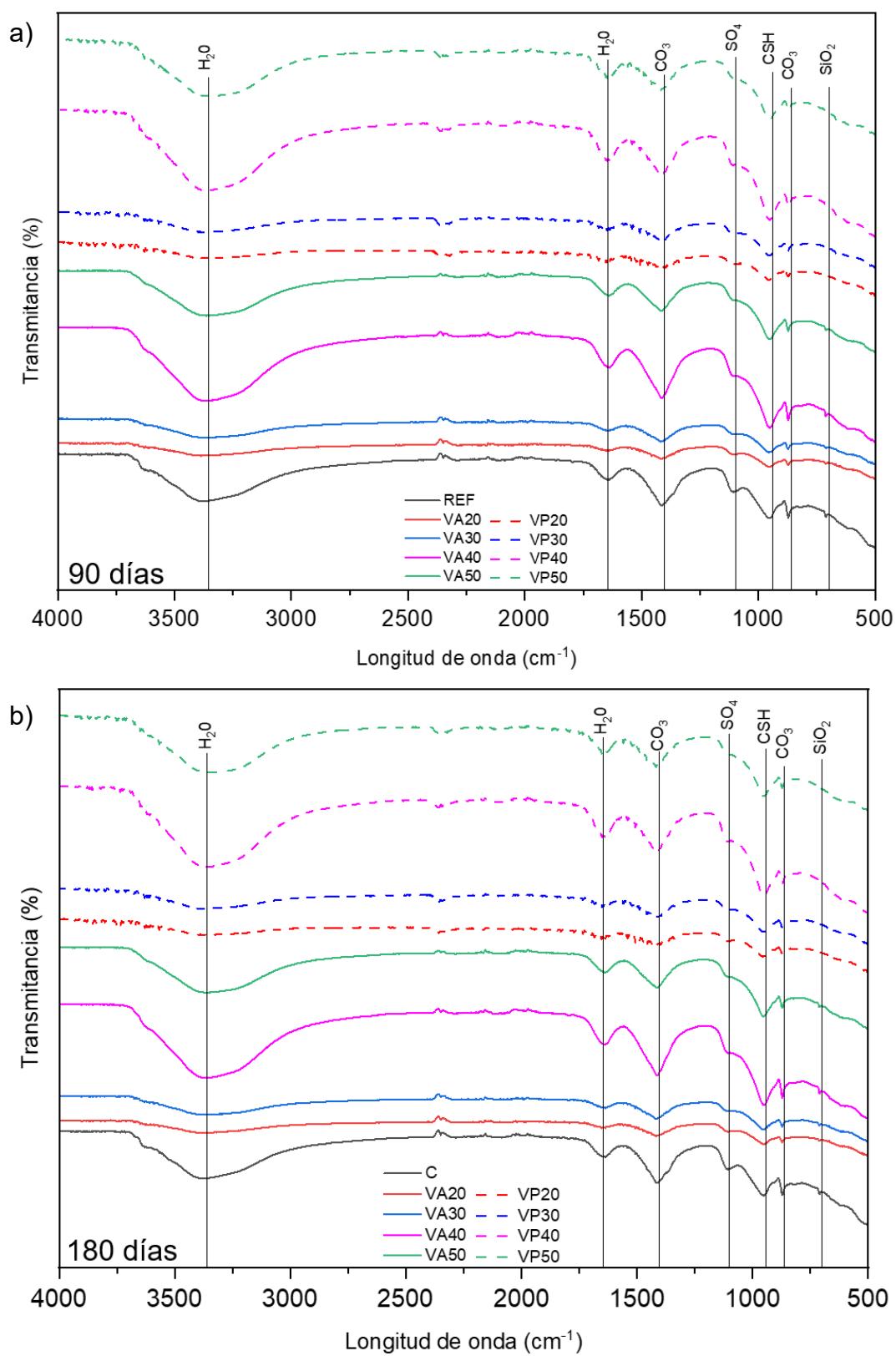


Figura 27. FTIR de muestras VA y VP a a) 90 y b) 180 días.

Se observan ligeros cambios en las bandas de los grupos funcionales de cada muestra. Al comparar las muestras que contienen vidrio con el mortero REF, se aprecian variaciones en ciertas regiones del espectro. Las muestras VA presentan una menor absorción, con respecto la muestra control, en las bandas asociadas al H₂O. De manera similar, las muestras VP muestran una tendencia similar con las bandas relacionadas con el agua, pero además exhibe un incremento en la intensidad cercana a los 950 cm⁻¹, correspondiente al CSH.

En ambas muestras, VA y VP, se identifica la presencia de SiO₂, sin embargo, las VA presentan una banda más ancha asociada a este grupo funcional, mientras que en las VP tiende a disminuir. Esto puede atribuirse a que el SiO₂ se está disolviendo y participando en la formación de un mayor contenido de CSH para las edades mayores.

En la figura 28, 29 y 30 se presentan las micrografías SEM correspondientes a los morteros con diferentes porcentajes de sustitución de vidrio y tres tiempos de curado.

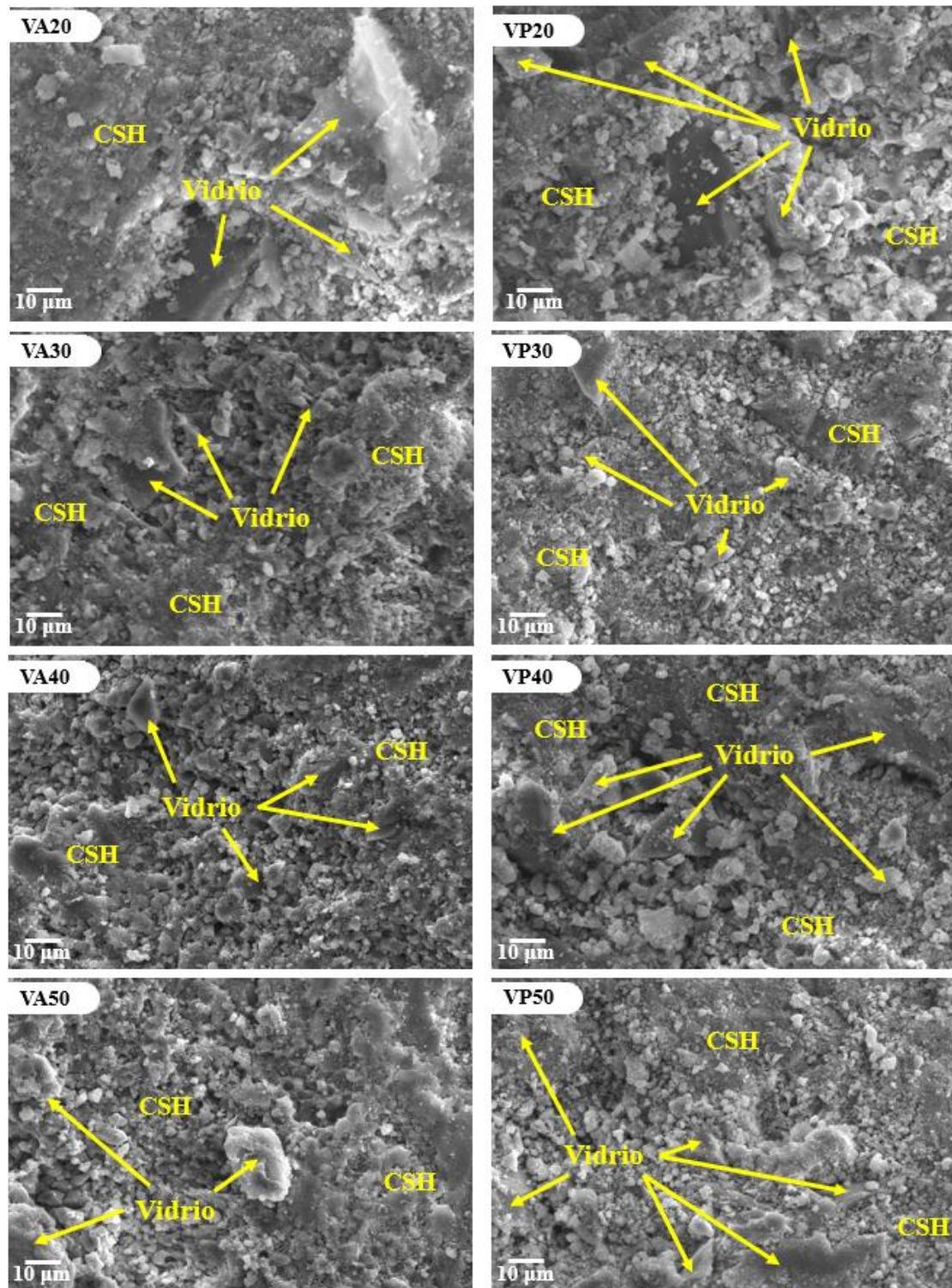


Figura 28. SEM de muestras con sustitución de vidrio a 28 días.

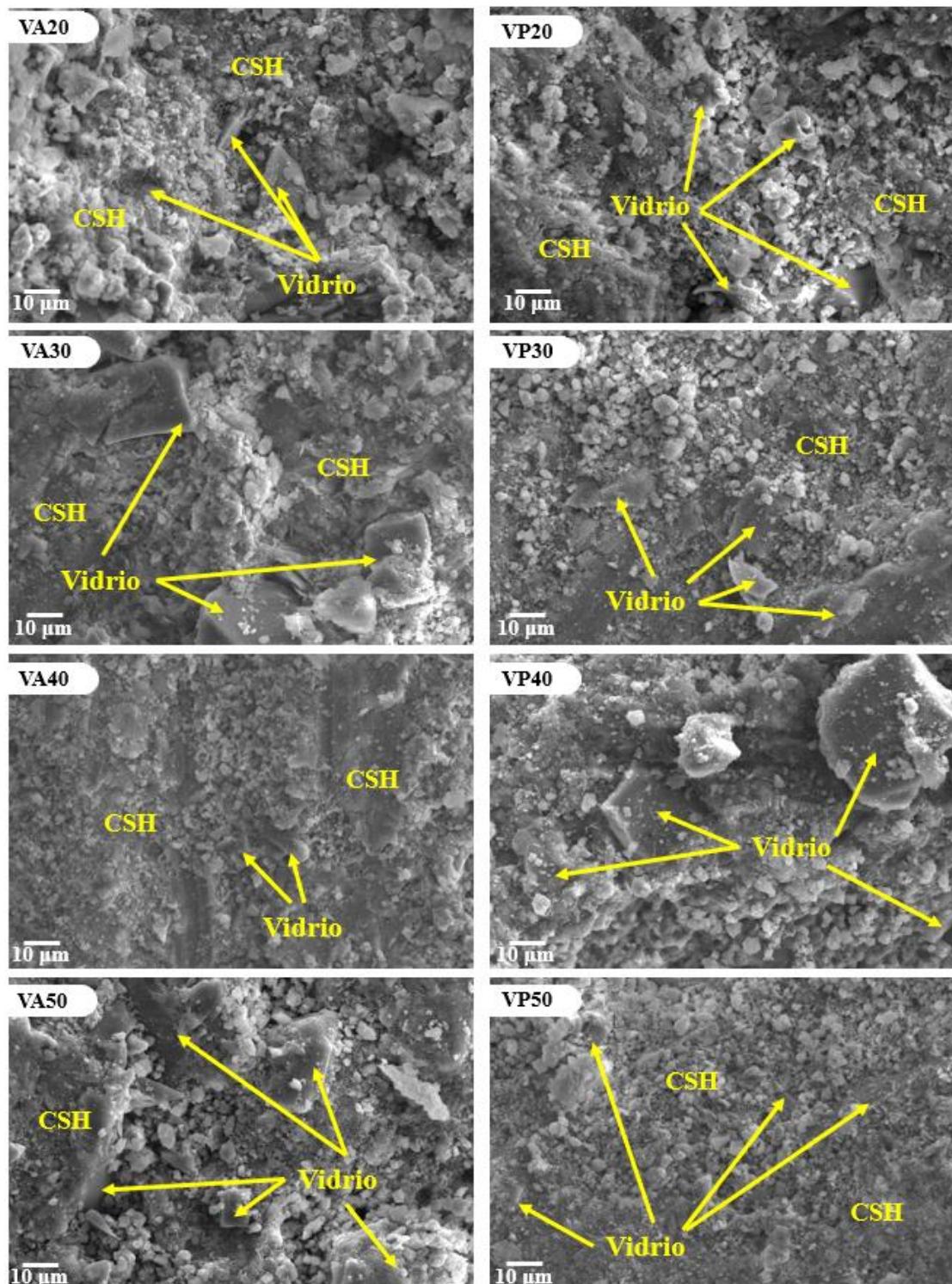


Figura 29. SEM de muestras con sustitución de vidrio a 90 días.

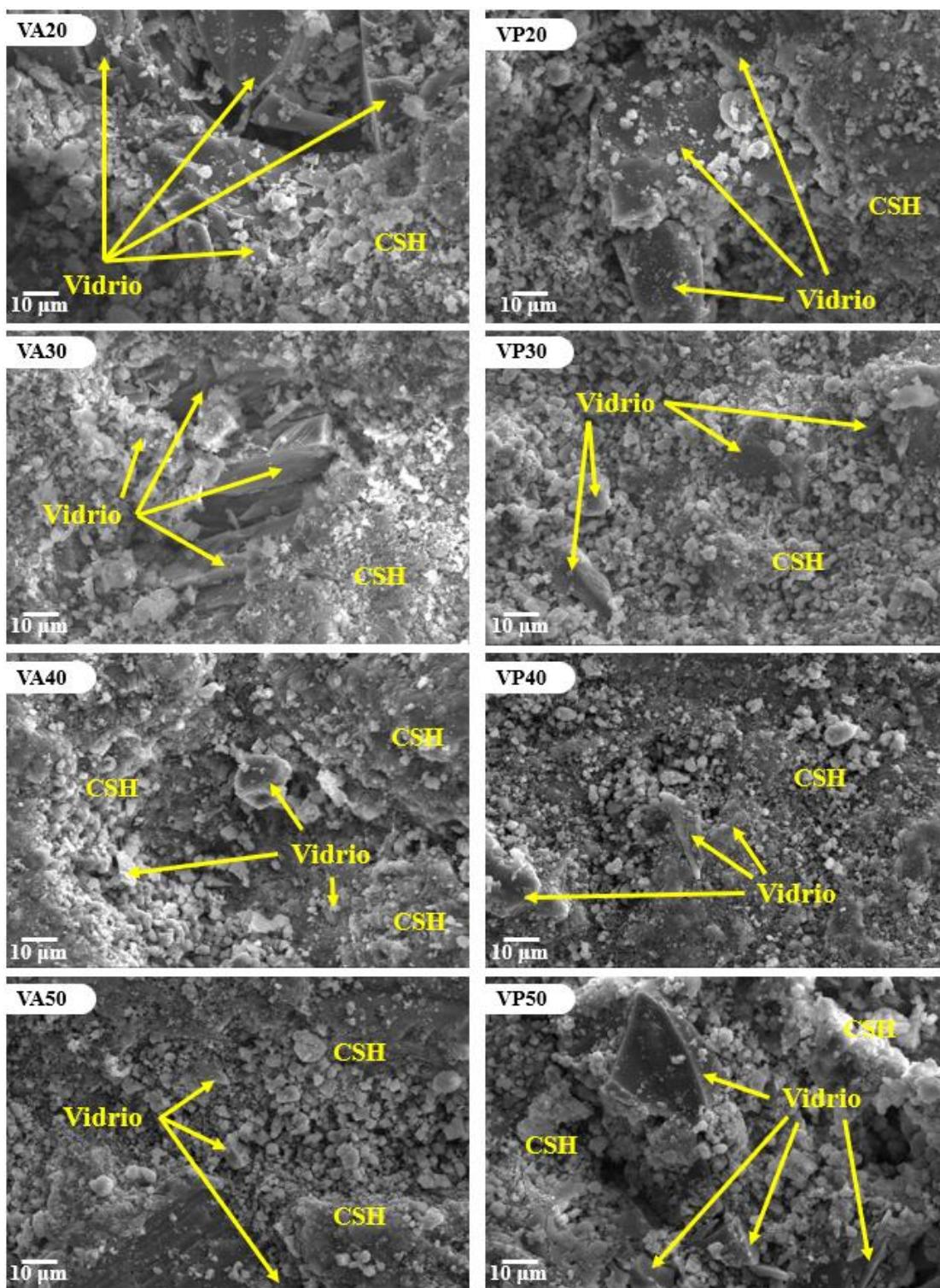


Figura 30. SEM de muestras con sustitución de vidrio a 180 días.

Se observa que las partículas de vidrio se mantienen diferenciadas en todas las muestras, rodeadas de productos de hidratación, principalmente CSH.

A los 28 días, la superficie de las partículas de vidrio presenta aun bordes bien definidos, lo que indica que todavía no empieza la disolución del material. En esta etapa, la matriz cementante muestra la formación moderada de CSH en ciertas zonas.

A los 90 días, por otro lado, se evidencia un aumento en la cantidad del gel CSH, especialmente las mezclas VP, donde se presenta una superficie irregular, sugiriendo un mayor grado de reacción; mientras las muestras VA, aunque demuestran los geles CSH, se ve ligeramente limitado, con estructuras porosas.

Finalmente, a los 180 días, la matriz cementante comienza a ser más compacta en todas las muestras, con una mayor cobertura de los productos de hidratación sobre las partículas del vidrio. En las muestras VA, el vidrio tiende a estar casi cubierto por el gel, lo que indica una reacción más avanzada y una posible incorporación de la sílice en la formación de estos. En las VP, se ve una tendencia similar, demostrando que el proceso de activación mecánica de las muestras esta beneficiando la incorporación del vidrio en la matriz.

Las imágenes SEM demuestran la evolución microestructural esperada del vidrio: a mayor tiempo de curado y el proceso de activación mecánica, se favorece la disolución del vidrio y su reactividad, por consecuencia, se genera la formación de más productos de hidratación secundarios, siendo el principal el gel CSH.

Así mismo, se realizó una calorimetría isotérmica para las muestras con diferentes porcentajes de sustitución. Fueron considerados tres días para la prueba; los resultados son exhibidos en la figura 31 para VA y 32 para VP.

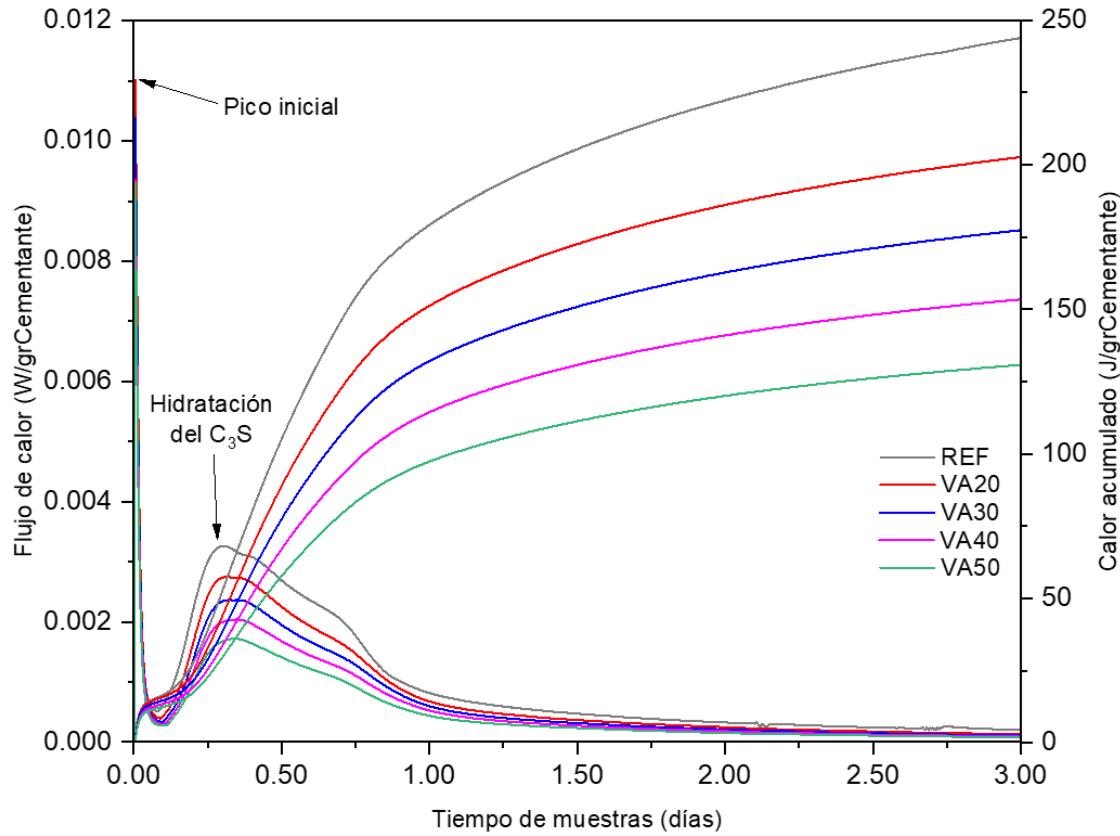


Figura 31. Calorimetría de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VA; Flujo de calor y Calor acumulado.

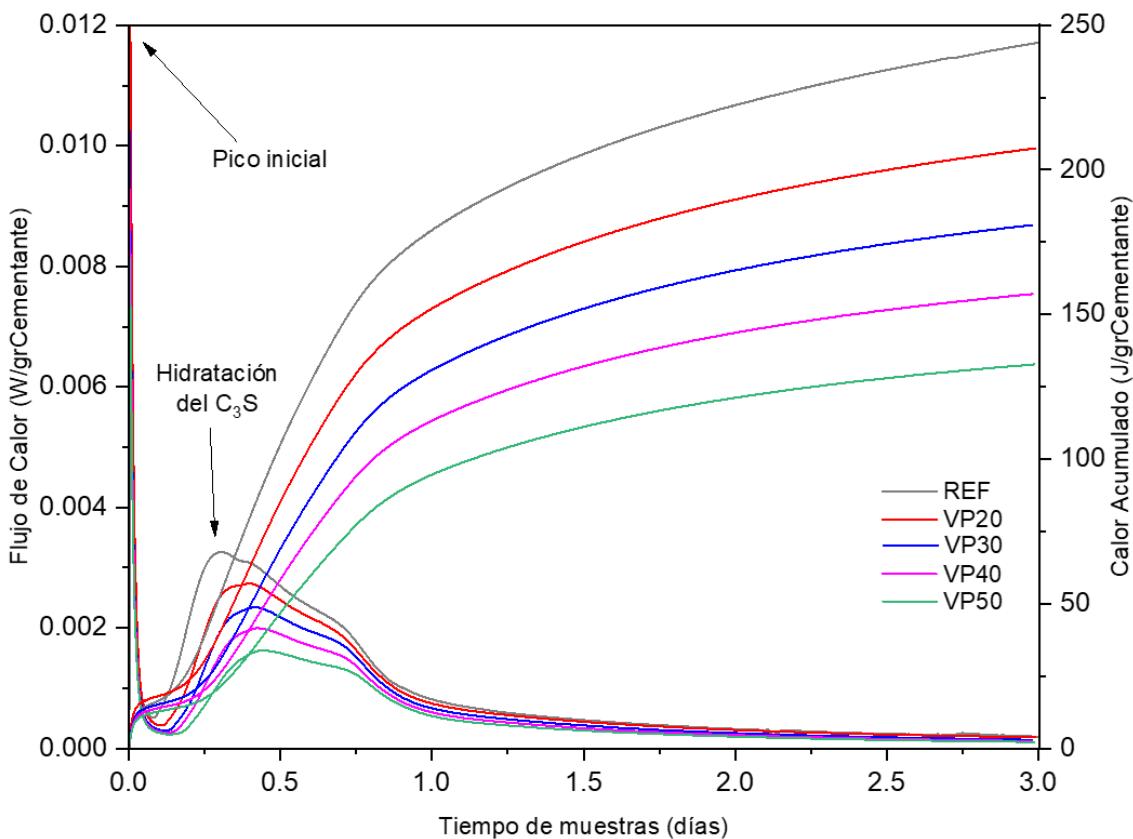


Figura 32. Calorimetria de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VP; Flujo de calor y Calor acumulado.

En todas las curvas se presenta el pico inicial asociado a la disolución del cemento y al humedecimiento de las partículas, seguido del segundo pico, correspondiente a la hidratación de la C₃S, responsable de la formación de los geles CSH y el desarrollo temprano de las resistencias mecánicas.

La mezcla REF presenta el mayor flujo de calor, lo que indica una mayor velocidad de hidratación y una cantidad más elevada de fases reactivas disponibles. Conforme se va a añadiendo más vidrio como sustituto, se observa una disminución progresiva en la intensidad del pico principal y un retraso leve en la aparición de este, confirmando la baja reactividad del vidrio frente a las fases de CP.

Sin embargo, aunque se este presentando un retraso en la hidratación a tempranas edades, la gráfica de calor acumulado demuestra que las curvas mantienen una pendiente continua, lo que sugiere que las reacción puzolánica del vidrio contribuye gradualmente a la hidratación a edades posteriores. Particularmente, las muestras con 20 y 30% de sustitución de CP por vidrio son las que demuestran un comportamiento más cercano al del mortero REF.

Se evidencia, entonces, que la incorporación del vidrio reduce la intensidad de la reacción inicial, pero favorece la evolución térmica de las muestras, lo cual concuerda con la presencia de los productos secundarios a edades posteriores.

El mecanismo mediante el cual un agregado reactivo puede formar un gel RAS depende de la presencia de sílice amorfa, la cual es el componente principal del vidrio de desecho [61]. Por ello resulta fundamental analizar la expansión de las muestras, ya que de este proceso podría afectar el comportamiento y durabilidad del mortero.

La figura 33 ilustra el comportamiento expansivo de las barras de mortero en función del tiempo de exposición. A partir de estos resultados se logra analizar la influencia de los diferentes porcentajes de vidrio en la expansión.

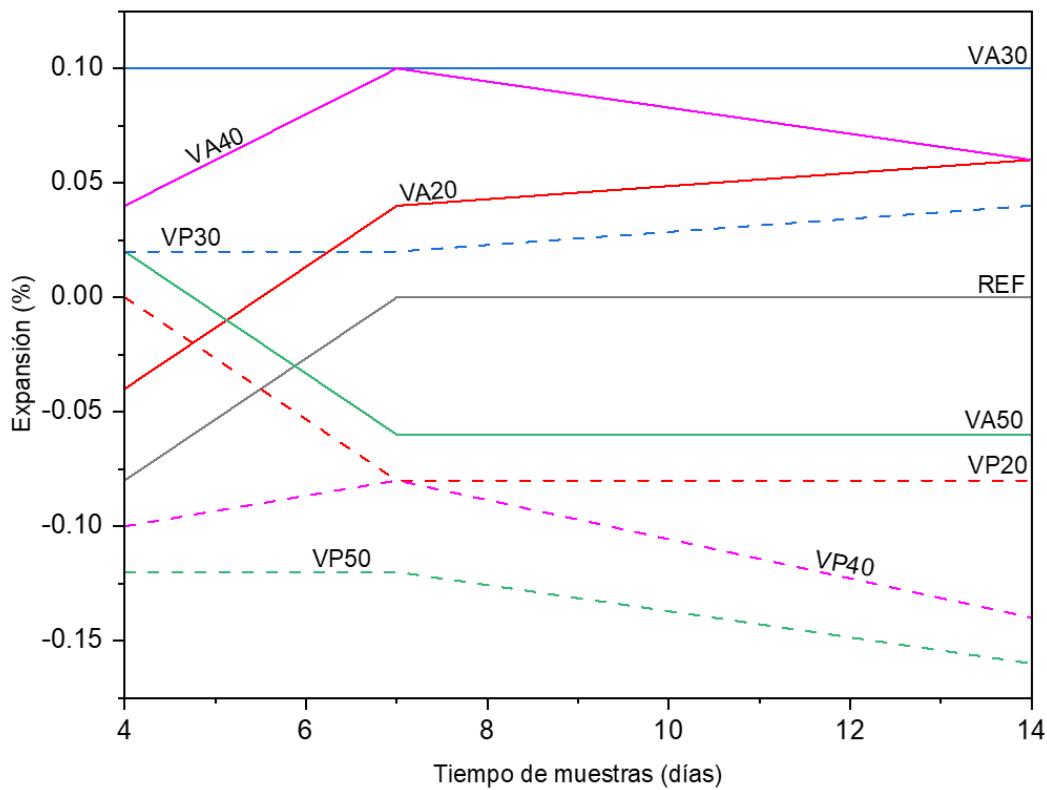


Figura 33. Expansión de las muestras VA y VP a 14 días.

Se muestran los valores de expansión obtenidos a 4, 7 y 14 días para las diferentes muestras evaluadas de acuerdo con la norma ASTM C1567 [50]. Según la metodología, una expansión superior al 0.10% a los 14 días se considera como un agregado potencialmente reactivo, mientras que valores inferiores se asocian a un material inocuo frente a una RAS.

Según Dhir y colaboradores [62] la disolución de vidrio en soluciones acuosas puede generar dos procesos distintos: uno en el que la red vítreo se vuelve más abierta, permitiendo la absorción del agua y provocando expansión; y otro donde la sílice del vidrio se disuelve gradualmente, reaccionando con el calcio en la solución para formar geles CSH.

Los resultados obtenidos exhiben que las muestras VA presentan expansiones positivas, destacando principalmente la muestra VA40, que alcanza el valor máximo registrado y la muestra VA30 que no tiene cambios con el paso de los días, pero su expansión demuestra que se mantiene en el rango límite. Esto sugiere que las muestras VA pueden generar cierta expansión. En contraste, las muestras VP muestran expansiones negativas o reducidas, lo que indica que se tiene cierta estabilidad y, por tanto, una baja tendencia a las reacciones.

Con el fin de analizar el segundo proceso descrito de Dhir y colaboradores, relacionado con la formación de geles CSH, y para analizar las propiedades mecánicas de los morteros, se realizaron los ensayos de resistencia a compresión y flexión. Los resultados son presentados en las figuras 34 y 35, respectivamente.

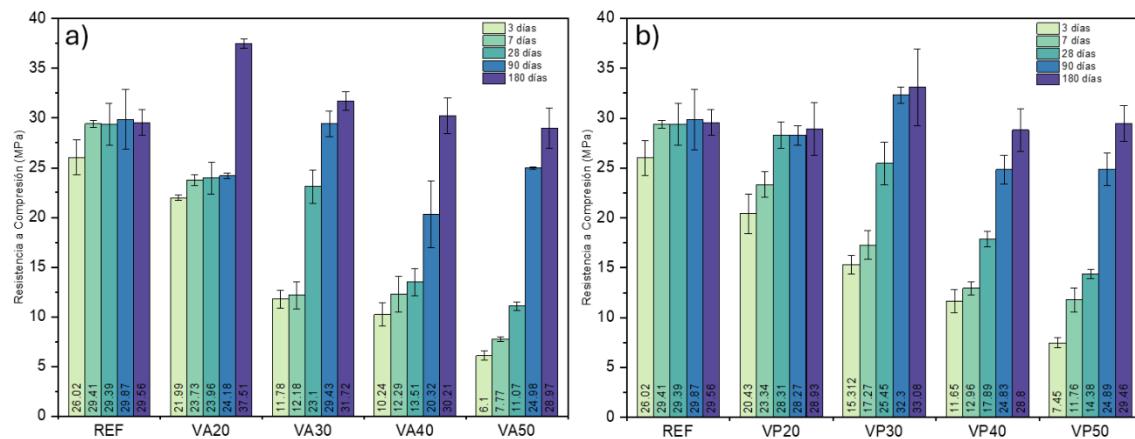
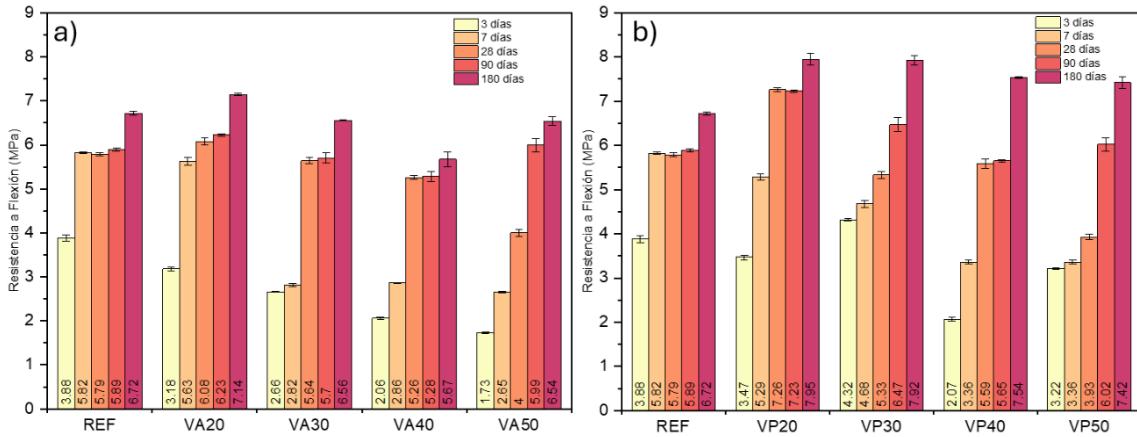


Figura 34. Resistencia a compresión de muestras a) VA y b) VP.



Las muestras REF demostraron resistencias de 26.02, 29.41, 29.39, 29.87 y 29.56 MPa a los 3, 7, 28, 90 y 180 días, respectivamente, para compresión y 3.88, 5.82, 5.79, 5.89 y 6.72 MPa para las mismas edades en la resistencia a flexión. Al sustituir los diversos porcentaje de CP por vidrio, ambas resistencias disminuyeron en las primeras edades de curado, esto se puede notar más en las muestras VA, donde no se realizó ninguna activación mecánica, lo que indica una reducción al rendimiento mecánico. Sin embargo, para las muestras VA a 180 días de curado se obtiene un aumento significativo de las resistencias y en las muestras VP, las cuales contaron con una activación mecánica, demostraron que, para resistencia a compresión, a los 90 y 180 días de curado se pueden obtener valores similares o mayores a los de la muestra REF; mientras que la resistencia a flexión de las muestras VP demuestran un aumento significativo incluso en la muestra con mayor sustitución de CP por vidrio.

La muestra VA20 presentó resistencias a compresión de 21.99, 23.73, 23.96, 24.18 y 37.51 MPa a los 3, 7, 28, 90 y 180 días, respectivamente. Estos valores indican una reducción de 15.47%, 19.3%, 18.46%, 19.07% para los primeros cuatro tiempos de curado y un aumento del 26.87% a 180 días de curado con respecto a la muestra control.

Del mismo modo, las resistencias a flexión demuestran una tendencia similar, obteniendo 3.18, 5.63, 6.09, 6.23 y 7.15 MPa respectivamente para los edades de curado, con obteniendo una reducción de 18.13% y 3.16% para edades tempranas (3 y 7 días) y un aumento de 5.09%, 5.65% y 6.31% para las edades restantes.

Por su parte, la muestra VA30 obtuvo resistencias a compresión de 11.78, 12.18, 23.1, 29.44 y 31.72 MPa mostrando una reducción de 54.74%, 58.57%, 21.39% y 1.48% para 3, 7, 28 y 90 y un aumento de 7.27% para un curado de 180 días. Las resistencias a flexión de esta fueron 2.66, 2.82, 5.65, 5.7 y 6.56 MPa, demostrando una reducción de 31.59%, 51.54%, 2.51%, 3.35% y 2.45% para las respectivas edades.

La muestra VA40 obtuvo 10.24, 12.29, 13.51, 20.33 y 28.98 MPa, a compresión, lo cual representa una disminución del 60.65%, 58.21%, 54.03% y 16.36% para 3, 7, 28 y 90 y un ligero aumento de 2.17% para 180 días. Por otro lado, sus resistencias a flexión mostraron resultados de 2.07, 2.87, 5.27, 5.29 y 5.68 MPa, lo que representó una reducción del 46.74%, 50.75%, 9.05%, 10.36% y 15.55% para las edades de 3, 7, 28, 90 y 180 días.

Por último, la muestra VA50 presentó resistencias a compresión de 6.08, 7.77, 11.07, 24.99 y 28.98 MPa para 3, 7, 28, 90 y 180 días, siendo que la sustitución redujo 76.62%, 73.57%, 62.33%, 16.37% y 1.99% para 3, 7, 28, 90 y 180 días. Mientras su resistencia a flexión obtuvo valores de 1.73, 2.65, 4, 6 y 6.54 MPa, siendo una reducción del 55.37%, 54.51%, 30.91% y 2.67% para 3, 7, 28 y 180 días y un ligero aumento del 1.66% para su curado de 90 días.

Por otro lado, la muestra VP20 alcanzó resistencias a compresión de 20.43, 23.34, 28.31, 28.27 y 28.93 MPa a los 3, 7, 28, 90 y 180 días, respectivamente. Estos resultados

reflejan una reducción de 21.48%, 20.66%, 3.69%, 5.37% y 2.14% durante las edades de curado en comparación con la muestra control. En cuanto a la resistencia a flexión, se obtuvieron valores de 3.47, 5.29, 7.27, 7.23 y 7.95 MPa, mostrando una disminución del 10.61%, 9.06% para 3 y 7 días, y un aumento de 25.48%, 22.61% y 18.25% para las edades restantes.

La muestra VP30 presentó resistencias a compresión de 15.31, 17.27, 25.45, 32.30 y 33.08 MPa, evidenciando una reducción del 41.16%, 41.28% y 13.42% para los primeros tres tiempos de curado, y un aumento del 8.11% y 11.89% a los 90 y 180 días. En flexión, los valores registrados fueron de 4.33, 4.69, 5.33, 6.48 y 7.92 MPa, correspondientes a un aumento de 11.38%, 9.84% y 17.84% para 3, 90 y 180 días y disminuciones de 19.43% y 7.93% para 7 y 28 días.

Por su parte, la muestra VP40 alcanzó resistencias a compresión de 11.66, 12.97, 17.89, 24.83 y 28.8 MPa, lo que representa una disminución del 55.21%, 55.91%, 39.12%, 16.9% y 2.58%, respectivamente. En el caso de la resistencia a flexión, los valores fueron de 2.07, 3.37, 5.6, 5.66 y 7.54 MPa, con reducciones del 46.67%, 42.15%, 3.32% y 4.07% para las primeras edades de curado y un aumento del 12.22% para 180 días.

Finalmente, la muestra VP50 mostró resistencias a compresión de 7.45, 11.77, 14.38, 24.90 y 29.46 MPa a los 3, 7, 28, 90 y 180 días, con reducciones del 71.36%, 59.99%, 51.07%, 16.68% y 0.37% respecto al control. En cuanto a la resistencia a flexión, se registraron valores de 3.22, 3.37, 3.93, 6.02 y 7.42 MPa, que representan disminuciones del 16.97%, 42.12% y 32.17% para las edades de 3, 7 y 28 días, así como un aumento del 2.10% y 10.45% a los 90 y 180 días de curado.

Según Nahi y colaboradores [63] la disminución de las resistencias mecánicas a tempranas edades se puede explicar por la lenta y baja reactividad puzolánica del vidrio a edades tempranas, por lo que el vidrio solo está actuando como material inerte y esto limita la formación de los geles CSH, aunque este mismo material sigue actuando como relleno.

Considerando, de igual manera, lo propuesto por Dhir y colaboradores [62], se permite establecer una correlación entre los procesos y el comportamiento mecánica. Las muestras VA reflejan el primer proceso, donde la red vítreo genera expansión, siendo que se mostraron ligeras expansiones y menos resistencias mecánicas. Por otro lado, las muestras VP, que mostraron expansiones reducidas y ligeras resistencias mecánicas, confirma que, aunque la activación mecánica puede inducir ligeras expansiones iniciales, también promueven una mejor integración del vidrio a la matriz cementante a largo plazo.

4.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerzo de SiO₂/NTC en morteros con diferentes porcentajes de sustitución.

Una vez analizado el comportamiento del vidrio, tanto con como sin activación mecánica, se procedió a incorporar el nanorefuerzo en las muestras. No obstante, antes de ello, se llevó a cabo la caracterización de los nanomateriales por separado y del nanorefuerzo en conjunto, obteniendo los resultados de la figura 36.

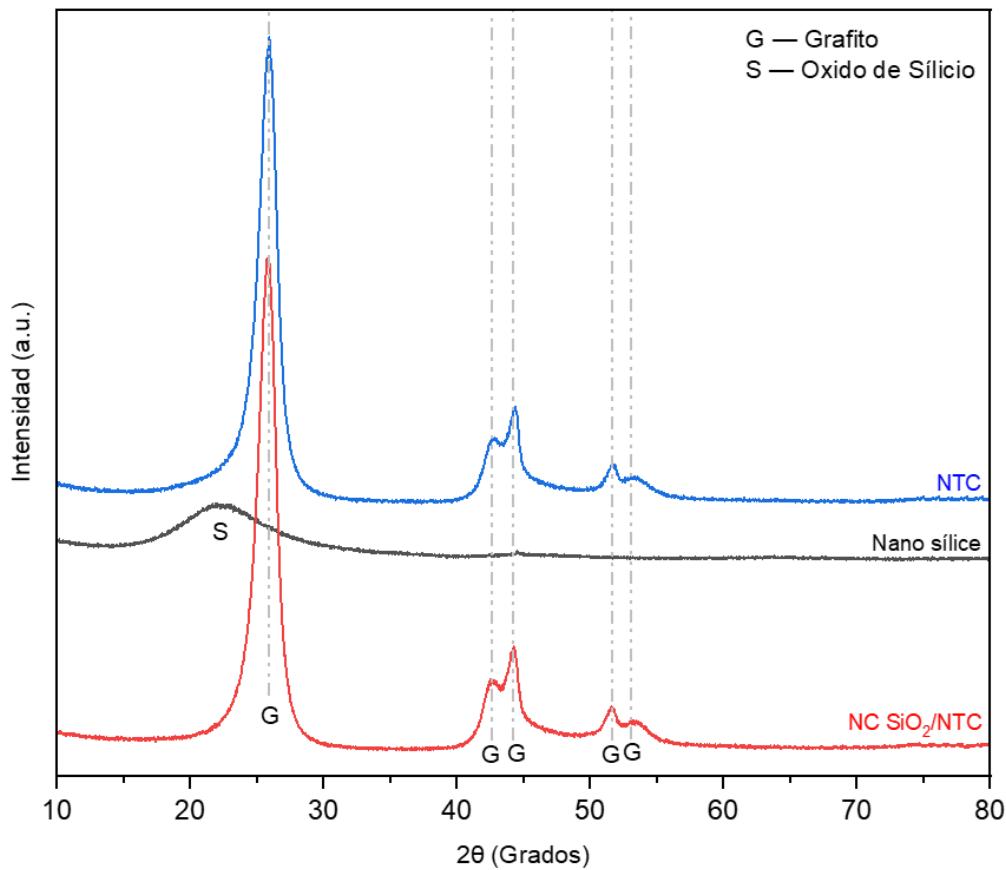


Figura 36. XRD de los nanomateriales y el nanorefuerzo.

En esta figura se muestra los diversos difractogramas de los nanomateriales, para la nSiO₂ donde se muestra una señal ancha en el ángulo 22° y la ausencia de más señales, por lo que se demuestra la naturaleza amorfa del mismo. Por otro lado, para los NTC, se obtuvieron diversas señales, características del grafito en las regiones de 20° a 30° y 40° a 55°, la presencia de estas señales muestra la cristalinidad del material.

El nanorefuerzo, al analizarlo, exhibe las mismas señales que los NTC en los mismos rangos, demostrando que no existe una alteración significativa con respecto a las señales del grafito, lo cual se atribuye a la cantidad de nSiO₂ utilizada es mínima (1%) con respecto al de los NTC (99%).

La siguiente caracterización realizada fue mediante SEM, con el propósito de determinar la morfología de las materias primas para el nanorefuerzo y, de igual manera, comprobar si la dispersión de este es efectiva, así como determinar si la nSiO₂ se encuentra adherida a los NTC. Las imágenes adquiridas se muestran en la figura 37.

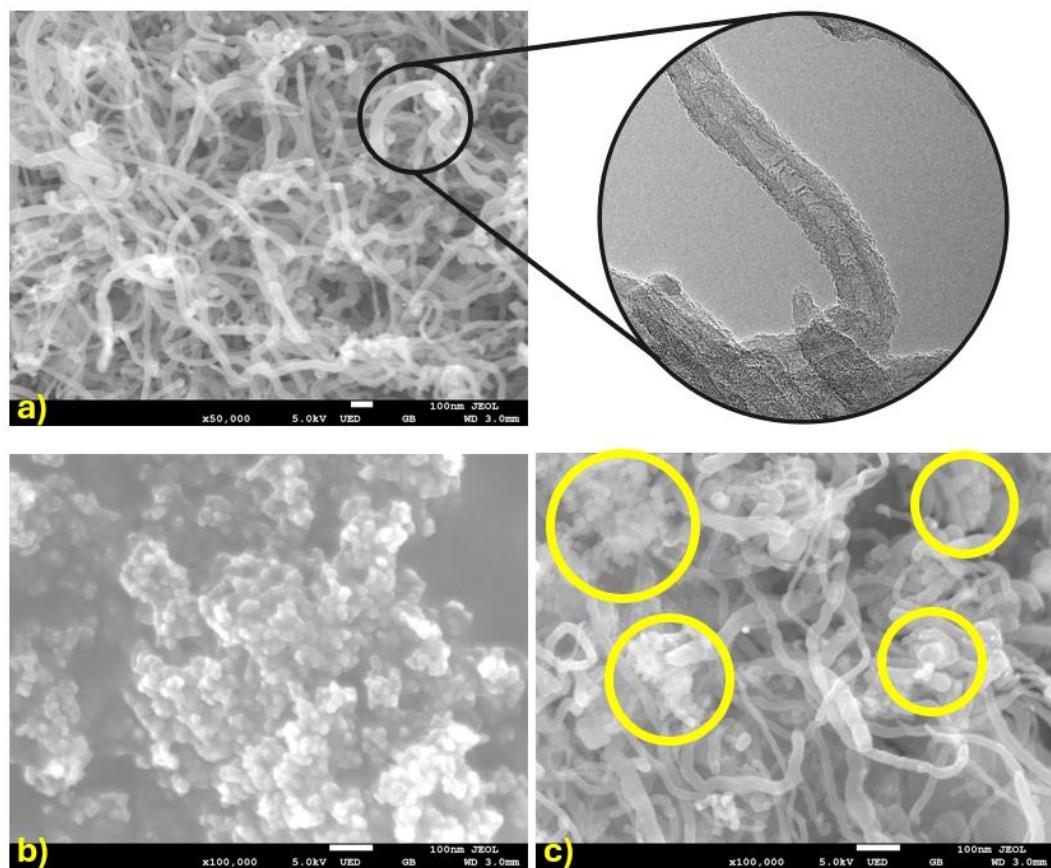


Figura 37. SEM de materias primas; a) NTC, b) nSiO₂ y c) Nanorefuerzo NTC/SiO₂.

Se exhibe, en el inciso a, los NTC los cuales cuentan con diámetros internos de entre 0.0188 y 0.0384 μm y su morfología alargada y delgada, con un acercamiento a los NTC,

demonstrando que son huecos. A continuación, en el inciso b se muestra la nSiO₂ con tamaños entre 0.2 y 1.8 μm y su morfología irregular y aglomerada.

Por último, en el inciso c se demuestra la el nanorefuerzo realizado, en donde se señala la nSiO₂ en los círculos negros. Dentro del nanorefuerzo hay partículas con tamaños de entre 0.0131 y 0.03967 μm para los NTC y de entre 0.02261 y 0.0603 μm para la nSiO₂.

En la figura 38 se puede observar el análisis DLS realizado para determinar el mejor método de dispersión para el nanorefuerzo, en este caso, se analizaron dos muestras AV (muestra donde el agua con vidrio no fue filtrada antes de realizar la dispersión) y AVNU (donde el agua fue filtrada antes de la dispersión).

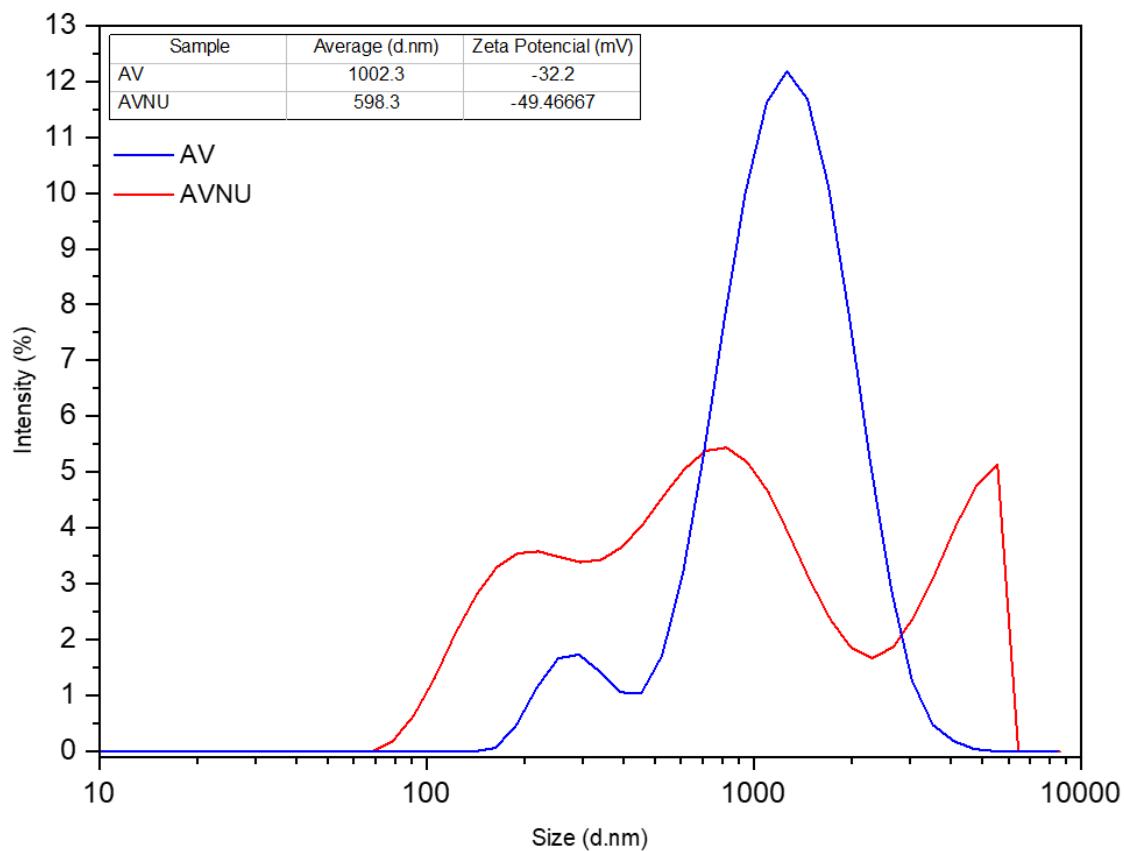


Figura 38. Análisis DLS del agua con vidrio para dispersión del nanorefuerzo.

La figura demuestra que al utilizar agua sin filtrar se pueden obtener partículas con tamaños grandes. El pico principal de la muestra AV se encuentra aproximadamente a los

300 y 1000 nm, indicando que se tienen partículas mayores o que los nanomateriales se aglomeraron, por lo tanto, no se está realizando una buena dispersión. En cambio, la muestra AVNU tiene un comportamiento diferente, con diversos picos de diferentes tamaños, lo cual indica que el material se está distribuyendo y no se está aglomerando.

Según la teoría DVLO [64,65], un sistema puede considerarse estable si la repulsión electrostática domina las fuerzas de Van Der Whaals. Las partículas deben superar una barrera energética de repulsión electrostática para acercarse y formar aglomeraciones.

En este caso, la muestra AVNU exhibe una mejoría para la dispersión del nanorefuerzo, presentando un -49.5 mV, lo cual indica una alta estabilidad coloidal con respecto a la muestra AV la cual presenta un -32.2 mV. Siendo de esta manera que se comprueba que la realización de un filtrado permite una mejor dispersión.

El análisis XRD y FTIR de las diferentes muestras, con los diferentes porcentajes de vidrio y la adición del nanorefuerzo, se presenta en las figuras 39 y 40.

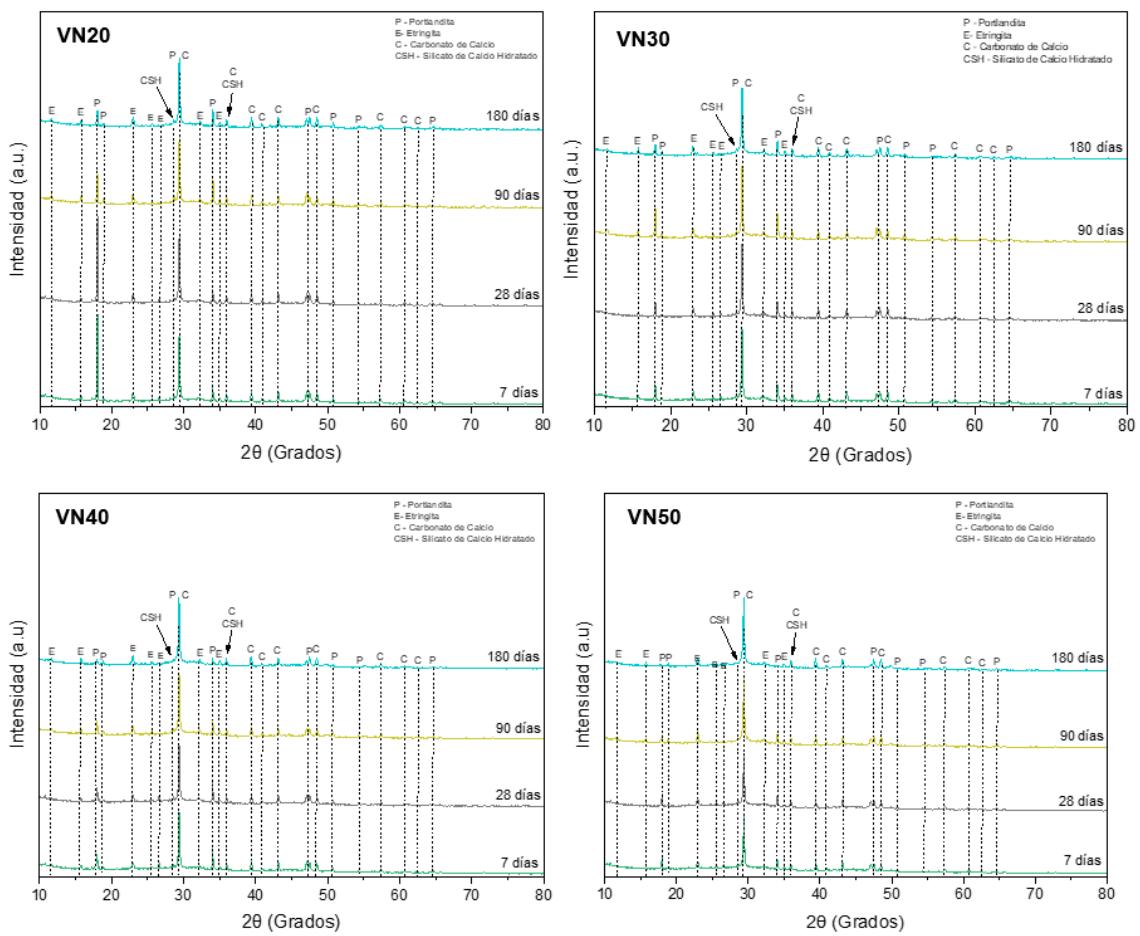


Figura 39. XRD de muestras diferentes porcentajes de sustitución y adición del nanorefuerzo a 7, 28, 90 y 180 días.

De la misma manera a los difractogramas XRD de las muestras VA y VP, las muestras VN presentan los picos característicos de los morteros, con las variaciones de intensidad en sus picos dependiendo de la cantidad de vidrio utilizada.

Se mantiene el comportamiento de las señales, siendo que a edades tempranas se ven altas intensidades en los picos de portlandita y al llegar a las edades mayores estos disminuyen. Además, no se observa un cambio significativo por la adición del nanorefuerzo, por lo que esto indica que la utilización de este material no afecta la

estructura cristalina de los productos de hidratación ni promueve la formación de nuevas fases.

A continuación se realizó el análisis FTIR correspondiente para terminar los posibles cambios por la adición del nanorefuerzo y el vidrio en conjunto, obteniendo los resultados mostrados en la figura 40.

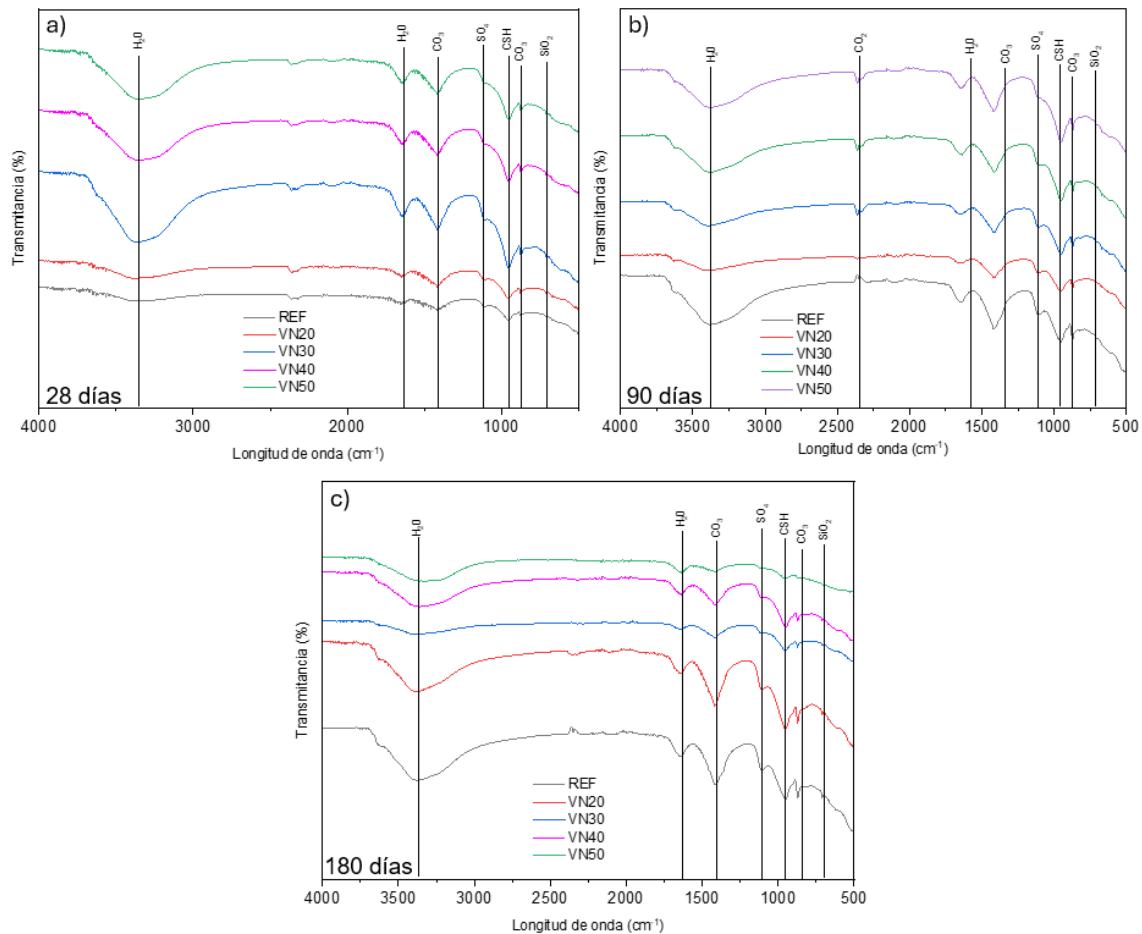


Figura 40. FTIR de muestras VN a) 28 días, b) 90 días y c) 180 días.

De igual manera que a las muestras VA y VP, las muestras VN presentan las bandas correspondientes a los grupos funcionales de cada muestra para morteros. Se presencia las mismas variaciones que en las muestras VA y VP, con una ligera disminución del SiO_2 en la longitud 950 cm^{-1} .

Así mismo, las muestras presentan una menor absorción de agua; sin embargo, a edades mayores se observa como la absorción pasa a ser mayor para las muestras VN30, VN40 y VN50.

En la figura 41, 42 y 43 se presentan las micrografías SEM correspondientes a los morteros con diferentes porcentajes de sustitución de vidrio, tiempos de curado y la adición del nanorefuerzo.

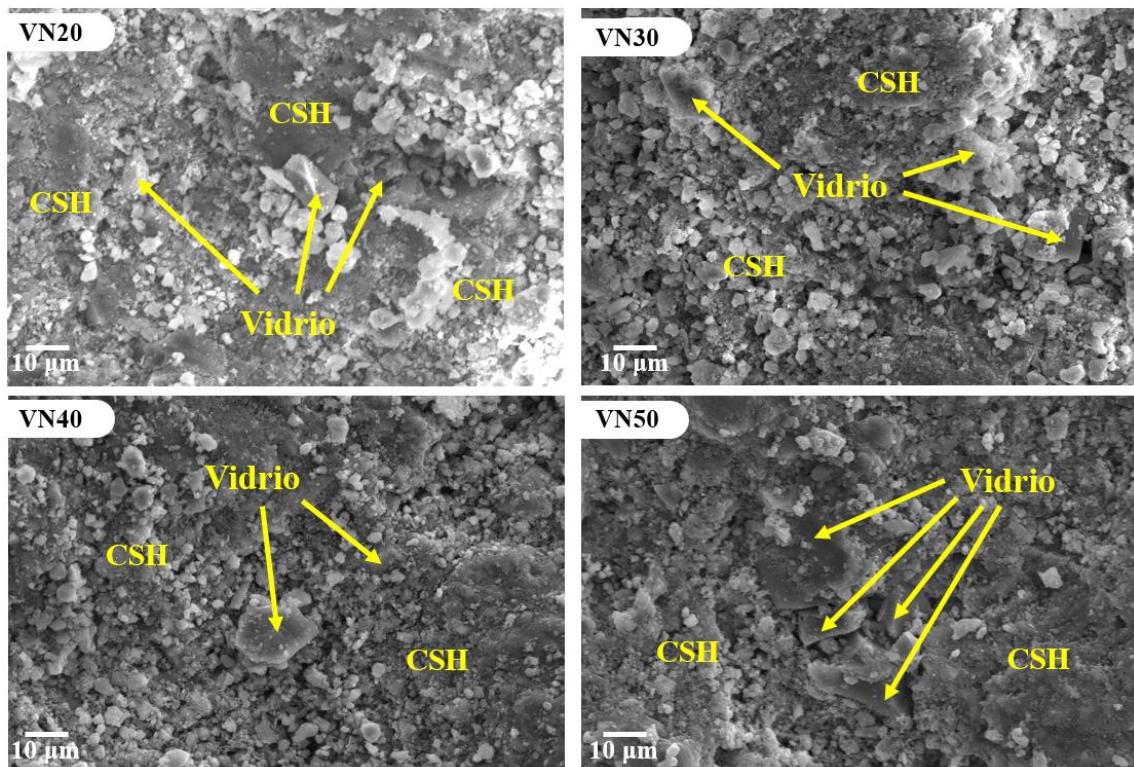


Figura 41. SEM de muestras VN a 28 días.

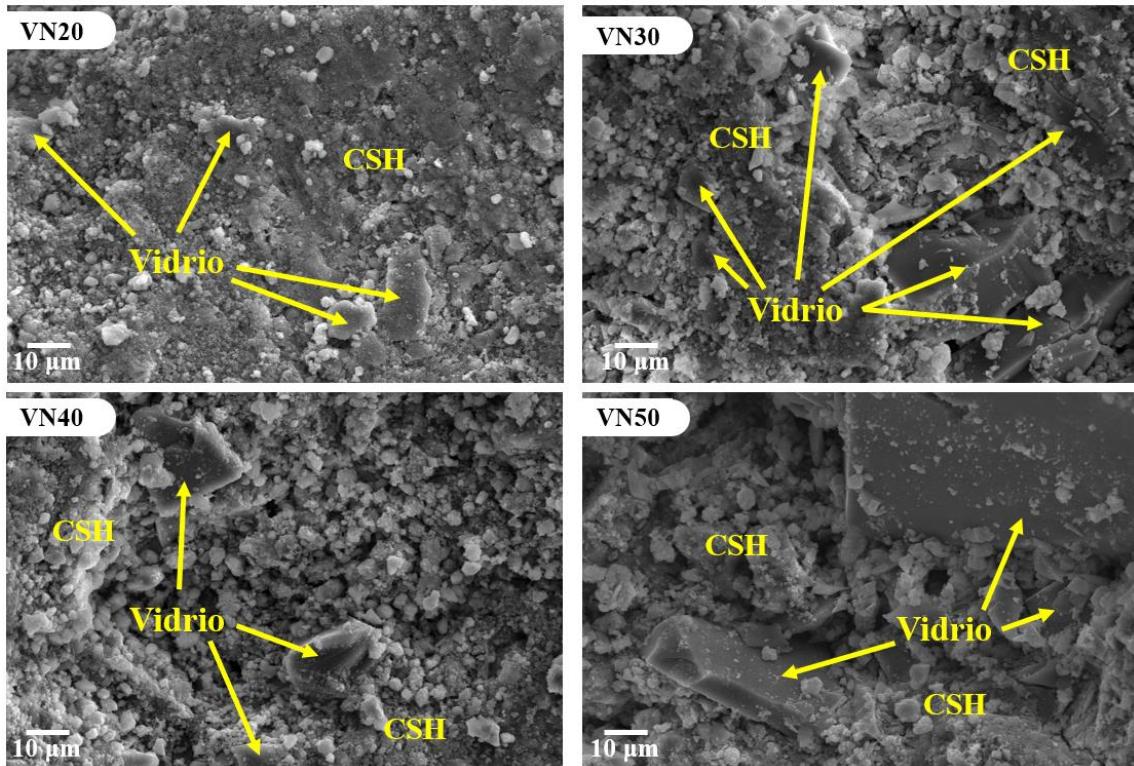


Figura 42. SEM de muestras VN a 90 días.

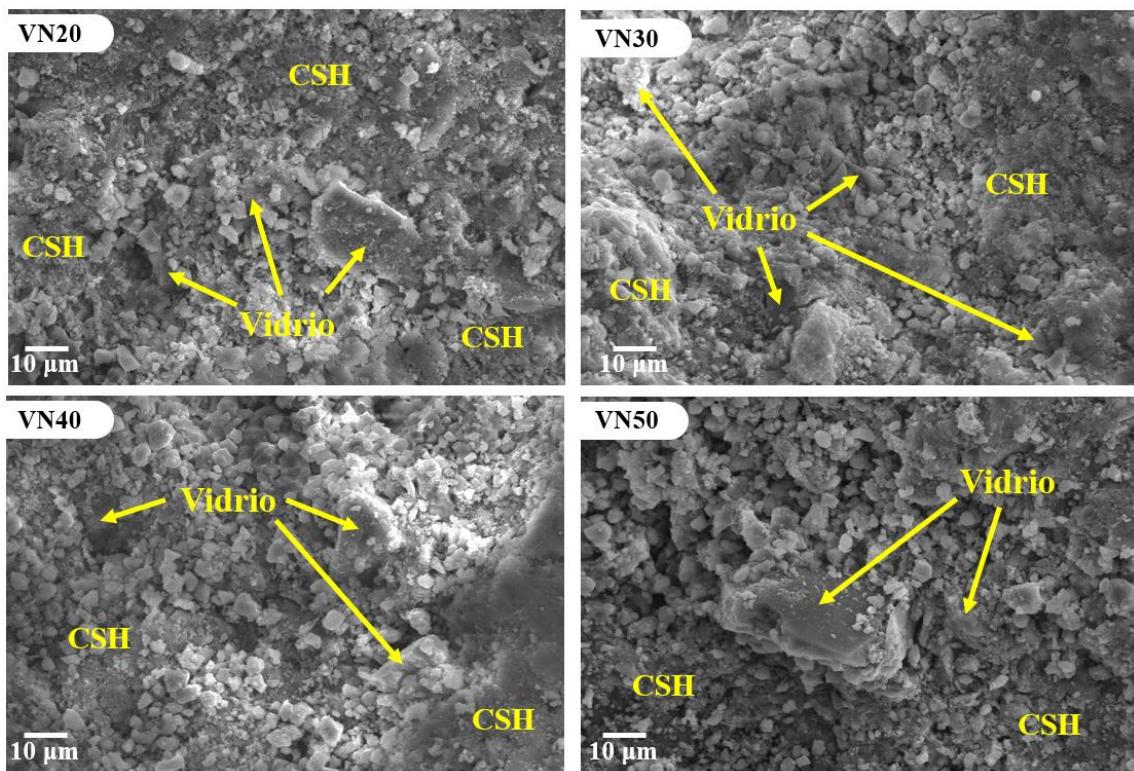


Figura 43. SEM de muestras VN a 180 días.

A los 28 días, las muestras presentan una microestructura relativamente densa, donde las partículas de vidrio se encuentran parcialmente cubiertas por los productos de hidratación, principalmente el CSH. Se logra observar la buena adherencia entre el vidrio y la matriz cementante, lo que sugiere que el nanorefuerzo esta favoreciendo la nucleación de los productos y la formación de los geles.

A los 90, se evidencia como hay un incremento en la compactación de la matriz y una mayor cantidad de productos de hidratación distribuidos más homogéneamente. Las partículas de vidrio tienen una superficie irregular y parcialmente disuelta, lo que podría indicar que se esta teniendo una interacción puzolánica más activa, posiblemente siendo promovida por el nanorefuerzo y las edades altas de curado.

A los 18 días, las micrografías revelan la estructura más densa y continua, con abundantes geles CSH que cubren las partículas de vidrio. Hay menos porosidad en las muestras y se tiene una mayor integración entre las fases, lo cual sugiere que el nanorefuerzo mejora la cohesión de la matriz. La persistencia de algunos fragmentos de vidrio indica que la reacción puzolánica continúa desarrollándose a edades avanzadas.

Se realizó una calorimetría isotérmica para las muestras, considerados tres días para la prueba; los resultados son exhibidos en la figura 44.

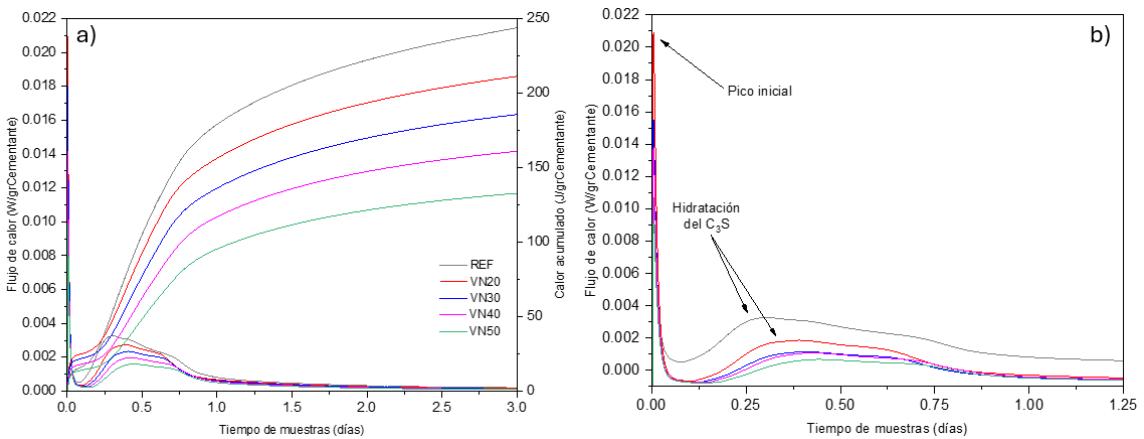


Figura 44. Calorimetria de morteros N; a) Flujo de calor y Calor acumulado,
b) Acercamiento Flujo de calor.

Se mantiene el pico inicial asociado a la disolución del cemento y al humedecimiento de las partículas junto con el pico de la hidratación de la C₃S. Sin embargo, se puede observar una disminución considerable de las muestras VN con respecto a REF e incluso a las muestras VA y VP.

No obstante, las muestras VN mantienen la tendencia de la curva de calor acumulado, lo que sugiere que seguirán reaccionando gradualmente a la hidratación a edades posteriores.

La figura 45 muestra las expansiones registradas para las muestras VN, medidas a 4, 7 y 14 días. Esto permitió comparar la evolución de la expansión de las muestras con respecto a las sustituciones y la adición del nanorefuerzo.

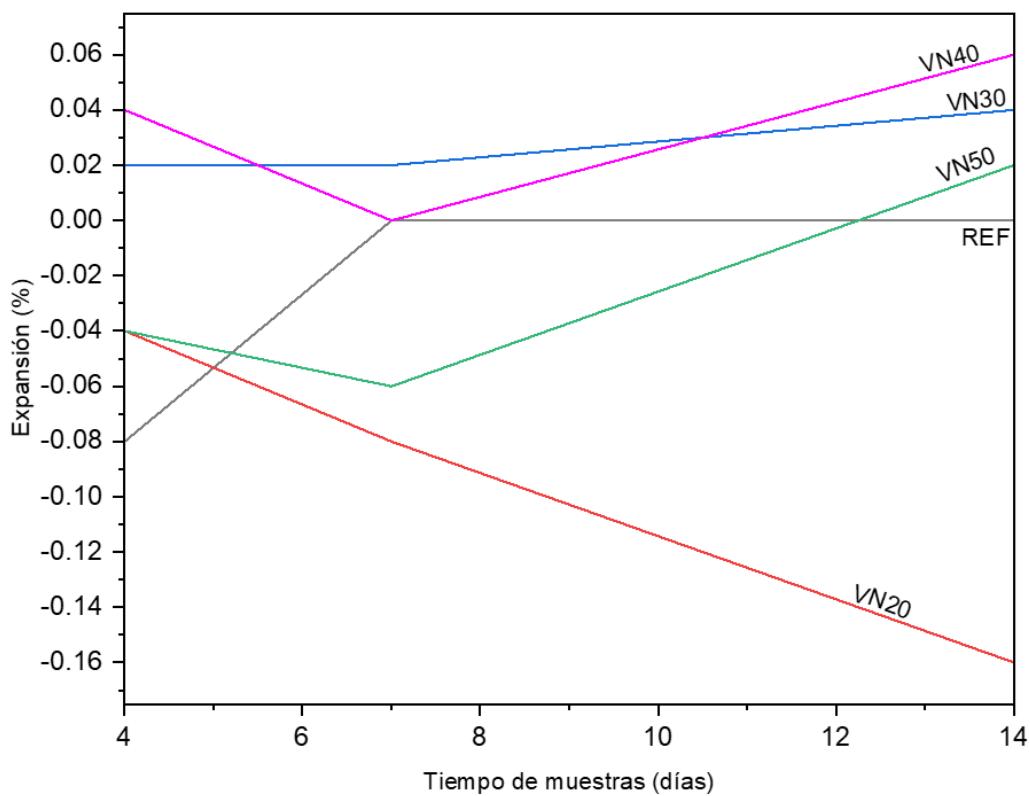


Figura 45. Expansión de muestras VN a 14 días.

La muestra REF presenta una expansión casi constante y cercana a 0 durante el periodo analizado, lo que indica estabilidad y ausencia de procesos de RAS. En contraste la muestras VN exhiben comportamientos distintos de expansión, aunque siendo valores menores a 0.10% como lo indica la normativa, por lo que se considero que los materiales no son reactivos al RAS.

Por lo que se podría concluir que el uso de vidrio en estas muestras no induce expansiones ni evidencia las RAS, lo cual permite que sea viable como material suplementario.

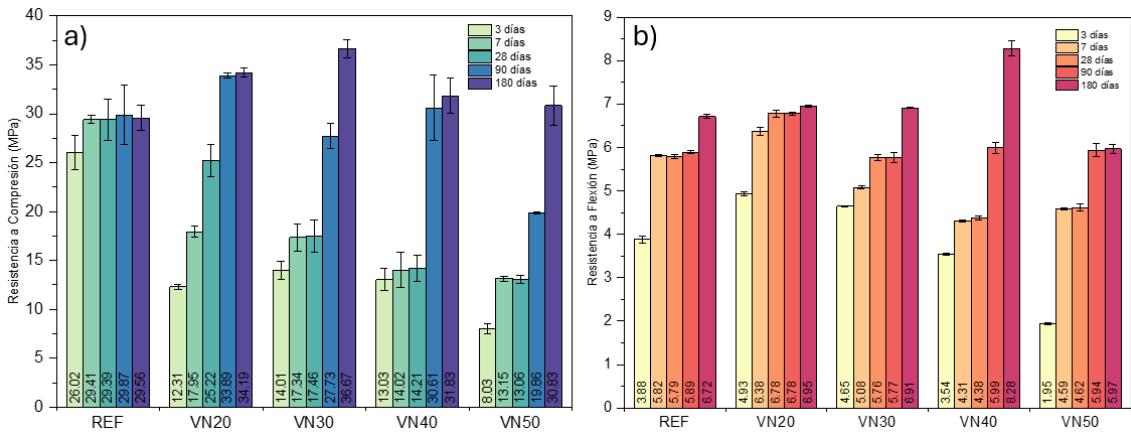


Figura 46. Propiedades mecánicas, a) Compresión y b) Flexión.

En la figura 46 se puede observar una tendencia similar a la vista en las figuras 33 y 34, siendo que en las edades tempranas de curado del mortero se mantiene la disminución del rendimiento mecánico. No obstante, la edades mayores, (90 y 180 días) presentan un comportamiento mecánico mayor a de la muestra control, con ciertas excepciones. Aparte, se demuestra que la incorporación de los NTC y la nSiO₂ al mortero mejoró significativamente las propiedades mecánicas, siendo más notorio esto en las resistencias a flexión.

La muestra VN20 registró valores de resistencia a compresión 12.31, 17.95, 25.22, 33.89 y 34.19 MPa a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado, respectivamente. En comparación con la mezcla control, estos resultados reflejan una disminución de 52.68%, 38.98% y 14.19% durante las primeras edades y un incremento del 13.43% y 15.63% a los 90 y 180 días, lo que evidencia una ganancia progresiva atribuible a la reacción puzolánica del vidrio a edades avanzadas. En cuanto a la resistencia a flexión, los valores obtenidos fueron 4.93, 6.39, 6.78, 6.79 y 6.96 MPa, mostrando aumentos de 27.05%, 9.77%, 17.16%, 15.04% y 3.49%, respectivamente.

Por otro lado, la muestra VN30 presentó resistencias a compresión de 14.01, 17.34, 17.46, 27.73 y 36.67 MPa, con reducciones del 7.20% al 46.17% en las primeras edades y una recuperación gradual que culminó con un incremento del 24.03% a los 180 días. En el caso de la flexión, los valores fueron 4.65, 5.08, 5.76, 5.78 y 6.91 MPa, lo cual corresponde a pérdidas de hasta 12.68% a edades tempranas y una mejora leve hacia edades mayores.

La muestra VN40 alcanzó valores de compresión de 13.03, 14.02, 14.21, 30.61 y 31.83 MPa, presentando disminuciones de hasta del 52.33% hasta los 28 días y una leve recuperación a largo plazo (+7.65% a los 180 días). En términos de resistencia a flexión, los resultados fueron 3.54, 4.31, 4.39, 6 y 8.28, lo que indica reducciones de entre 8% y 26%, manteniendo una tendencia de mejora a medida que avanza el curado.

Finalmente, la muestra VN50 mostró el comportamiento más menor en edades tempranas, con resistencias a compresión de 8.03, 13.15, 13.02, 19.87 y 30.83 MPa, equivalentes a reducciones de hasta 69.13% a 3 días, pero con aumento de 4.26% a los 180 días. En cuanto a la resistencia a flexión, los valores de 1.95, 4.59, 4.63, 5.94 y 5.97 MPa reflejan un comportamiento similar: una caída importante en los primeros días (de hasta 49.7%) y una recuperación sostenida hacia edades prolongadas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal desarrollar un mortero utilizando un material alternativo para la sustitución del CP, siendo en este caso el VSC, con un proceso de activación mecánica y la adición de un nanorefuerzo de NTC/SiO₂.

5.1. Conclusiones.

A partir del análisis riguroso de los resultados experimentales obtenidos se establecen las siguientes conclusiones fundamentales.

1. Se confirmó que la sustitución parcial de CP por vidrio de desecho, junto con la incorporación de un nanorefuerzo de SiO₂/NTC, permite la obtención de morteros con un desempeño mecánico adecuado y cambios microestructurales significativos.
2. La realización de una activación mecánica al vidrio induce la liberación de iones sodio, lo que incrementa el pH de la solución y permite la generación de un ambiente alcalino que favorece tanto la dispersión del nanorefuerzo como el desarrollo de las propiedades mecánicas del mortero. El vidrio activado presenta una reactividad puzolánica temprana; sin embargo, a partir de las 2 horas de activación no se observa un cambio significativo en esta propiedad.
3. El tratamiento de activación mecánica mejora el desempeño mecánico de los morteros con vidrio, obteniendo incrementos de hasta 5% y 4% en resistencia a compresión y flexión, respectivamente, respecto a la muestra REF, y mejoras del

27% y 12% de resistencia a compresión y flexión, respectivamente, frente a las muestras sin activación. Los mejores resultados se obtuvieron con activaciones superiores a 2 horas para resistencia a compresión y superiores a 3 horas para flexión.

4. Se determinó que 3 horas era el tiempo óptimo de activación mecánica del vidrio debido a que este periodo favorece la liberación de iones y el aumento del pH y mejora la reactividad puzolánica. Aunque la reactividad no demostró incrementos significativos después de las 2 horas de activación, las activaciones de 3 horas exhibieron mejores propiedades mecánicas y microestructurales.
5. El análisis integrado de hidratación, productos formados, microestructura y comportamiento mecánico presentado por el vidrio de desecho activado mecánicamente demostró que este material funciona adecuadamente como material cementante suplementario en sustituciones de 20% y 30%, manteniendo resistencias similares al mortero de REF. La activación mecánica incremento la reactividad, lo que permitió que los morteros VP desarrollaran microestructuras más densas y alcanzarán resistencias superiores a las presentadas por las muestras REF y VA, especialmente a edades de curado de 90 y 180 días.
6. Las sustituciones altas de CP por vidrio (40% y 50%) tuvieron una mejoría en sus hidratación y desarrollo de geles CSH al realizar una activación mecánica, permitiendo que se superara al mortero REF. Estos resultados demostraron que la eficiencia del vidrio como material cementante suplementario depende de: tamaño de partícula, método de activación, cantidad incorporada y curados.
7. La incorporación de 0.025% de nanorefuerzo de SiO₂/NTC mejoró el comportamiento mecánico de los morteros con vidrio, especialmente en

sustituciones moderadas, debido a la acción sinérgica que densifica la microestructura y mejora la continuidad de la matriz. Este efecto se acentúa a 90 y 180 días, debido a que la reacción puzolánica del vidrio sigue generando productos de hidratación adicionales que potencian la interacción con el nanorefuerzo. En sustituciones altas, la mejoría disminuye, mostrando la resistencia depende tanto del porcentaje de vidrio como de la disponibilidad de productos hidratados.

5.2. Recomendaciones.

A continuación, se enlistan algunas recomendaciones que permitirán incrementar los conocimientos afines a esta tesis.

1. Establecer diferentes métodos de dispersión para la optimización de la distribución del nanorefuerzo en la matriz del mortero.
2. Estudiar el efecto del tipo de vidrio utilizado como sustituto del CP, considerando su composición químico y tamaño.
3. Evaluar las propiedades mecánicas de morteros con vidrio a edades superiores a 180 días, con la finalidad de determinar la continuidad de la reacción puzolánica a largo plazo.
4. Analizar la durabilidad de los morteros ante agentes agresivos, como cloruros y sulfatos,
5. Determinar el comportamiento térmico y el impacto ambiental de estos morteros, evaluando su potencial para generar un ahorro energético y sostenibilidad.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] O.Y. Bayraktar, Possibilities of disposing silica fume and waste glass powder, which are environmental wastes, by using as a substitute for Portland cement, Environmental Science and Pollution Research 28 (2021) 16843–16854. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12195-9>.
- [2] R.K. Lopes, J.C. Piovesan, B.F. Tutikian, A.E.B. Grondona, Partial replacement of Portland cement with industrial glass waste in mortars, Revista IBRACON de Estruturas e Materiais 14 (2021). <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000200014>.
- [3] O.A. Mendoza-Reales, G. Sierra-Gallego, J.I. Tobón, The mechanical properties of Portland cement mortars blended with carbon nanotubes and nanosilica: A study by experimental design., DYNA (Colombia) 83 (2016) 136–141. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n198.55559>.
- [4] J. Antonio, P. Madrazo, S. Diego, C. Carlos, T. García, Materiales de Construcción: los cementos., n.d. [\(accessed April 21, 2024\).](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2219/course/section/2101/Leccion9b.pdf)
- [5] Expansión., Emisiones de CO₂ en México, Datosmacro.Com (2023). <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/mexico#:~:text=México%20sube%20sus%20emisiones%20de%20CO2&text=En%20la%20tabla%20vemos%20que,3%2C09%20toneladas%20por%20habitante> (accessed April 21, 2024).

- [6] E. Sandoval García, G.G. Ramos Rodríguez, A. Correa Torres, Midiendo la economía circular en México., INEGI 14 (2022).
<https://rde.inegi.org.mx/index.php/2023/01/04/midiendo-la-economia-circular-en-mexico/> (accessed May 19, 2024).
- [7] S. Alejandro García Sepúlveda Gobernador, J. Klakamp Directora general del proyecto Eugenio Prieto Soto Director, Directorio Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Nuevo León Clean Air Institute, n.d. <http://www.cleanairinstitute.org> (accessed April 22, 2024).
- [8] SEMARNAT, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Promedio diario de residuos urbanos recolectados por entidad federativa y municipio., SEMARNAT (2020).
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM02_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*&NOMBREANIO=* (accessed April 23, 2024).
- [9] E. Robayo-Nuñez, COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE, Bogotá, 2013.
https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/11159/RobayoNunezE_stefania2013.pdf (accessed May 20, 2024).
- [10] A. Aguado, Sistema constructivo de paneles aligerados con poliestireno expandido y malla electrosoldada espacial: estudio estructural y optimización, Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-93477>.
- [11] Olga. Díaz-Ponce, La evolución de la industria del cemento con énfasis en latinoamérica, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf (accessed April 15, 2025).
- [12] K.L. Scrivener, R. Snellings, The Rise of Portland Cements, Elements 18 (2022) 308–313. <https://doi.org/10.2138/gselements.18.5.308>.

- [13] B. Vásquez, S. Corrales, Industria del Cemento en México: Análisis de sus determinantes, Probl Desarro 48 (2017) 113–138. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>.
- [14] Cámara Nacional del Cemento (CANACEM), Historia de la Cámara Nacional del Cemento, 2023 (n.d.). <https://canacem.org.mx/historia-de-la-canacem/#:~:text=Durante%20el%202021%20la%20producción,la%20producción%20de%20cemento%20gris>. (accessed April 15, 2025).
- [15] M.Á. SanJuán Barbudo, S. Chinchón Yepes, Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland, San Vicente, 2014. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf (accessed April 15, 2025).
- [16] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori, Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry, J Clean Prod 51 (2013) 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- [17] M. Diez, Synthesis by supercritical fluids methods of advanced additions for cementitious materials, n.d. <https://www.researchgate.net/publication/324981319>.
- [18] The hydration of Portland cement, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences 359 (1978) 435–451. <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0050>.
- [19] E. Gutiérrez Padilla, Formulación de Vidrio Sodo-Cálcicos con Bajo Contenido de Óxido de Magnesio y Estudio de Propiedades Físicas para su Aplicación en Procesos de Prensa y Soplo-Prensa, Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014. <http://eprints.uanl.mx/4136/1/1080253831.pdf> (accessed July 1, 2025).
- [20] ASTM, ASTM C162. Terminology of Glass and Glass Products, (2005). <https://doi.org/10.1520/C0162-05>.
- [21] A. Alfonso, A. Jaidar, M. del C. Fariñas, El mundo mágico del vidrio., 1st ed., Fondo de Cultura Económica, México, 1995.

- [22] D.A. Rodríguez Carvajal, Fabricación y Caracterización de Vidrios del Sistema Na₂O-Ce₂O₃-GeO₂, Maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 2013.
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/625/1/Tesis%20Da vid%20Alejandro%20Rodríguez%20Carvajal.pdf> (accessed July 1, 2025).
- [23] A.L. Borges, S.M. Soares, T.O.G. Freitas, A.O. Junior, E.B. Ferreira, F.G.S. Ferreira, Evaluation of the pozzolanic activity of glass powder in three maximum grain sizes, Materials Research 24 (2021). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0496>.
- [24] T.A. García Mejía, R.M. Ramírez Zamora, Activación alcalina de residuos industriales. Una alternativa para su reutilización en la construcción, Academia XXII 14 (2023) 222–241. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2023.27.85764>.
- [25] Inmovilización de Resinas Iónicas de grado Nuclear en Materiales activados Alcalinamente (IRINEMA), ACTIVACIÓN ALCALINA, (2019).
<https://irinema.ietcc.csic.es/index.php/activacion-alcalina-2/> (accessed August 25, 2024).
- [26] F. Puertas, M. Torres-Carrasco, Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation, Cem Concr Res 57 (2014) 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.12.005>.
- [27] K. Li, J.X. Lu, Z. Chen, H.A. Ali, J. Ban, C.S. Poon, A novel self-hardening cementitious material by the self-activation of glass powder, Constr Build Mater 411 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134559>.
- [28] J. Lin, Y. Zhang, Z. Yang, A Review of Recent Advances in Alkali-activated Materials from Silica-rich Wastes Derived Sodium Silicate Activators, Journal of Advanced Concrete Technology 21 (2023) 189–203.
<https://doi.org/10.3151/jact.21.189>.
- [29] H. Du, K.H. Tan, Waste glass powder as cement replacement in concrete, Journal of Advanced Concrete Technology 12 (2014) 468–477.
<https://doi.org/10.3151/jact.12.468>.

- [30] H. Du, K.H. Tan, Properties of high volume glass powder concrete, *Cem Concr Compos* 75 (2017) 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>.
- [31] W. Yin, X. Li, T. Sun, Y. Chen, F. Xu, G. Yan, M. Xu, K. Tian, Utilization of waste glass powder as partial replacement of cement for the cementitious grouts with superplasticizer and viscosity modifying agent binary mixtures: Rheological and mechanical performances, *Constr Build Mater* 286 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122953>.
- [32] M.I.M. Alzeer, H. Nguyen, T. Fabritius, H. Sreenivasan, V.V. Telkki, A.M. Kantola, C. Cheeseman, M. Illikainen, P. Kinnunen, On the hydration of synthetic aluminosilicate glass as a sole cement precursor, *Cem Concr Res* 159 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106859>.
- [33] R.R. Balandrán Quintana, A.M. Mendoza Wilson, Un acercamiento a los fundamentos y aplicaciones de la nanotecnología, *TECNOCIENCIA Chihuahua* 15 (2021) 76–94. <https://doi.org/10.54167/tecnociencia.v15i3.861>.
- [34] Tsotsis Georgios, Aplicaciones de la Nanotecnología en los materiales de la construcción., (2018).
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/133970/Memòria_TsotsisGeorgios.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed May 20, 2024).
- [35] J. Yu, M. Zhang, G. Li, J. Meng, C.K.Y. Leung, Using nano-silica to improve mechanical and fracture properties of fiber-reinforced high-volume fly ash cement mortar, *Constr Build Mater* 239 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117853>.
- [36] R. Garg, R. Garg, M. Bansal, Y. Aggarwal, Experimental study on strength and microstructure of mortar in presence of micro and nano-silica, in: *Mater Today Proc*, Elsevier Ltd, 2020: pp. 769–777. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.167>.
- [37] A.A. Ramezanianpour, M. Mortezaei, S. Mirvalad, Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on transport and mechanical properties of blended cement

- mortars, Journal of Building Engineering 44 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102667>.
- [38] H. El-Didamony Ahmed, Chemical and Engineering Properties of Blended Cement Containing Micro- and Nano-silica, American Journal of Chemical Engineering 5 (2017) 111. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170505.13>.
- [39] M. Aly, M.S.J. Hashmi, A.G. Olabi, M. Messeiry, E.F. Abadir, A.I. Hussain, Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar, Mater Des 33 (2012) 127–135.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.008>.
- [40] S. Hu, Y. Xu, J. Wang, P. Zhang, J. Guo, Modification effects of carbon nanotube dispersion on the mechanical properties, pore structure, and microstructure of cement mortar, Materials 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13051101>.
- [41] E. Cerro-Prada, R. Pacheco-Torres, F. Varela, Effect of multi-walled carbon nanotubes on strength and electrical properties of cement mortar, Materials 14 (2021) 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma14010079>.
- [42] T. Manzur, N. Yazdani, M.A.B. Emon, Potential of carbon nanotube reinforced cement composites as concrete repair material, J Nanomater 2016 (2016).
<https://doi.org/10.1155/2016/1421959>.
- [43] A. Raza, M. Bhandari, H.K. Kim, H.M. Son, B. Huang, I.W. Nam, A study on mechanical characteristics of cement composites fabricated with nano-silica and carbon nanotube, Applied Sciences (Switzerland) 11 (2021) 1–16.
<https://doi.org/10.3390/app11010152>.
- [44] M.J. Quintana-San José, M.A. Zugasti-Macazaga, M. del C. Uribe-Zallo, B. Uribe-Ortega, R. Jiménez-Saavedra, E. Cohen-Gómez, V. Gálvez-Pérez, M.E. Sousa-Rodríguez, M.T. Sánchez-Cabo, M. Colorado-Soriano, J. Aguilar-Franco, Seguridad y Salud en el Trabajo con Nanomateriales, Madrid, 2015.
<http://publicacionesoficiales.boe.eshttp://www.insht.es/catalogopublicaciones/>.

- [45] V. Varisha, M.M. Zaheer, S.D. Hasan, Effect of Nanosilica and Carbon Nanotubes Addition on Mortar Mechanical and Durability Properties, *Journal of Civil Engineering and Construction* 11 (2022) 210–227. <https://doi.org/10.32732/jcec.2022.11.4.210>.
- [46] O.A. Mendoza-Reales, G. Sierra-Gallego, J.I. Tobón, Propiedades mecánicas de morteros de cemento Portland adicionados con nanotubos de carbono y nanosilica: Estudio por diseño de experimentos, *DYNA (Colombia)* 83 (2016) 136–141. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n198.55559>.
- [47] G. Mishra, Co-effect of carbon nanotube and nano-sized silica on dispersion and mechanical performance in cementitious system, *Diam Relat Mater* 127 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109162>.
- [48] Organización Internacional para la Normalización., ISO-12775-1997. Guidelines on types of glass of normal bulk-production composition and their test methods, (1997). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0a7de238-a34b-4a7e-9871-e8a4ac64278f/iso-12775-1997> (accessed September 11, 2024).
- [49] A. International, files indexed by mero, ASTM C305 - Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency 1, n.d. www.astm.org.
- [50] ASTM, ASTM C109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, (n.d.). https://www.astm.org/c0109_c0109m-20.html (accessed August 27, 2024).
- [51] ASTM, ASTM C348: Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars (accessed August 27, 2024).
- [52] ASTM, ASTM C1567-08. Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method) 1, 2008. www.astm.org,.

- [53] ASTM, ASTM C150:Standard Specification for Portland Cement, 2012. www.astm.org.
- [54] R. Snellings, A. Bazzoni, K. Scrivener, The existence of amorphous phase in Portland cements: Physical factors affecting Rietveld quantitative phase analysis, *Cem Concr Res* 59 (2014) 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.002>.
- [55] Y. Sumra, S. Payam, I. Zainah, The pH of Cement-based Materials: A Review, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 35 (2020) 908–924. <https://doi.org/10.1007/s11595-020-2337-y>.
- [56] L. Hupa, Melt-derived bioactive glasses, in: *Bioactive Glasses*, Elsevier, 2011: pp. 3–28. <https://doi.org/10.1533/9780857093318.1.3>.
- [57] P. Pisciella, M. Pelino, FTIR spectroscopy investigation of the crystallisation process in an iron rich glass, *J Eur Ceram Soc* 25 (2005) 1855–1861. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.012>.
- [58] M. Dobiszewska, W. Pichór, T. Tracz, A. Petrella, M. Notarnicola, Effect of Glass Powder on the Cement Hydration, Microstructure and Mechanical Properties of Mortar, in: MDPI AG, 2023: p. 40. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013040>.
- [59] H. Hu, Q. Zhang, Mechanochemical preparation of mineral based adsorbent and its effective purification ability for wastewater, *KONA Powder and Particle Journal* 38 (2021) 155–167. <https://doi.org/10.14356/kona.2021012>.
- [60] S. Qaidi, H.M. Najm, S.M. Abed, Y.O. Özkılıç, H. Al Dugaishi, M. Alosta, M.M.S. Sabri, F. Alkhatib, A. Milad, Concrete Containing Waste Glass as an Environmentally Friendly Aggregate: A Review on Fresh and Mechanical Characteristics, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15186222>.
- [61] M.T. Tognonvi, A. Taghit-Hamou, L.K. Konan, A. Zidol, W.C. N'Cho, Reactivity of Recycled Glass Powder in a Cementitious Medium, *New Journal of Glass and Ceramics* 10 (2020) 29–44. <https://doi.org/10.4236/njgc.2020.103003>.

- [62] Z. Zhang, J. Du, M. Shi, Quantitative Analysis of the Calcium Hydroxide Content of EVA-Modified Cement Paste Based on TG-DSC in a Dual Atmosphere, *Materials* 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15072660>.
- [63] L.M. Federico, S.E. Chidiac, Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods, *Cem Concr Compos* 31 (2009) 606–610. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.001>.
- [64] R.K. Dhir, T.D. Dyer, M.C. Tang, Alkali-silica reaction in concrete containing glass, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 42 (2009) 1451–1462. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9465-8>.
- [65] S. Nahi, N. Leklou, A. Khelidj, M.N. Oudjit, A. Zenati, Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder, *Constr Build Mater* 262 (2020) 120875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120875>.
- [66] J.H. Adair, E. Suvaci, J. Sindel, Surface and Colloid Chemistry, in: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2001: pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/01622-3>.
- [67] C. Freitas, R.H. Mü, Effect of light and temperature on zeta potential and physical stability in solid lipid nanoparticle (SLNTM) dispersions, 1998.