

**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**

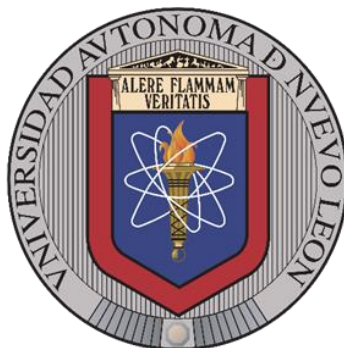
**BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO.**

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

**Febrero, 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.**

**Febrero, 2026**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2026/01/08

**DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL**

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es "**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO DE DESECHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE CARBONO**", que presenta la **ING. BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

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

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

Atentamente,

**Dra. Mayra Zylila Figueroa Torres**

Directora de Tesis



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • [www.fic.uanl.mx](http://www.fic.uanl.mx)



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2026/01/21

**DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL**

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

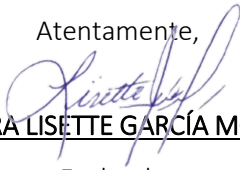
Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO DE DESECHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE CARBONO”**, que presenta la **ING. BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

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

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

Atentamente,

  
**M.C. XIOMARA LISETTE GARCÍA MONTELONGO**

Evaluador



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2026/01/08

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PRESENTE. -

Estimado Dr. Mendoza Rangel,

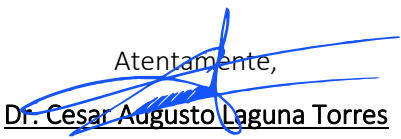
Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO DE DESECHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE CARBONO”**, que presenta la ING. BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

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

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

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

Atentamente,

  
Dr. Cesar Augusto Laguna Torres

Evaluator



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455

81 8329 4000 ext. 4060 • www.fic.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

### Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE ☒ PROFESOR ☐

NOMBRE: BLANCA ANAKAREN CASTRO BOTELLO

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO ☐ TESIS ☒ PI ☐ OTRO ☐

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

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

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN  
EN LA TESIS IMPRESA.

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

Nombre y firma de quien corrigió:

*Ramón Longoria*

Arq. Ramón Longoria Ramírez  
Asesor Profesional de Apoyo

*José Manuel Mendoza Rangel*  
Dr. José Manuel Mendoza Rangel

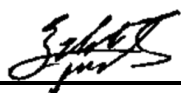
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación  
Ciudad Universitaria, 07 de Enero de 20 26



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455  
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234  
correo electrónico: [spi.fic@uanl.mx](mailto:spi.fic@uanl.mx)

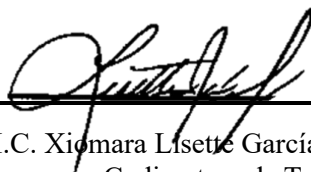
**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN MORTERO ECOLÓGICO  
OBTENIDO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR  
VIDRIO DE DESECHO Y NANOREFORZADO CON SÍLICE/NANOTUBOS DE  
CARBONO**

Aprobación de la Tesis



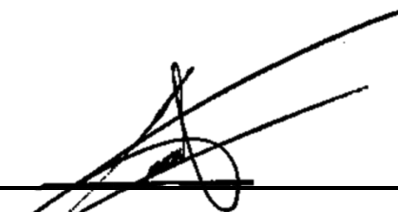
---

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres  
Directora de Tesis



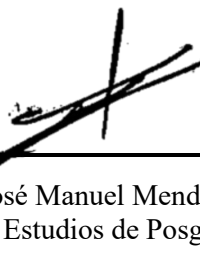
---

M.C. Xiomara Lisette García Montelongo  
Codirectora de Tesis



---

Dr. Cesar Augusto Laguna Torres  
Asesor de Tesis



---

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.**

### **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: 137**

**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 y evaluar morteros con altas sustituciones de cemento Portland por vidrio de desecho de naturaleza sódico-cálcica, con el fin de aprovechar su composición química y su capacidad para actuar como solución alcalina en sistemas cementantes alternativos. Este enfoque permitió prescindir del uso de activadores químicos convencionales, facilitando la adecuada incorporación y dispersión de un nanoreforzo compuesto por dióxido de Silicio y nanotubos de Carbono dentro de la matriz cementante. El estudio de enfoque en el análisis de distintas dosificaciones de sustitución sobre el comportamiento mecánico y microestructural de los morteros, comparándolos con un mortero convencional, mediante técnicas de caracterización como XRD, XRF, SEM, ICP, FTIR, calorimetría isotérmica, pruebas de fluidez y el método R3, con el fin de identificar una dosificación óptima con adecuado desempeño mecánico y menor impacto ambiental.

#### **Contribuciones y Conclusiones.**

Los resultados demostraron que el vidrio de desecho puede emplearse como sustituto de cemento Portland, incluso en altos porcentajes de reemplazo, sin comprometer el desempeño mecánico del mortero. Asimismo, se evidenció que su agitación en agua favorece la disolución del nanoreforzo y la formación de una matriz más densa, reflejándose en mejoras en las propiedades mecánicas y microestructurales a edades tardías de curado. De este modo, el trabajo propone una alternativa sostenible para la reducción del uso de cemento Portland mediante la valorización de residuos de vidrio, aportando bases para el desarrollo de morteros más sustentables.

**FIRMA DEL ASESOR:**



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad, fortaleza y salud para 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 Elizondo y Juana Maria Botello Bravo, 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 Botello, quien siempre me apoyó. Darles las gracias por siempre brindarme su amor y apoyo, por apoyarme a creer en mí y por confiar en que podría terminar 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 Chávez y Diego Alexis Minaya Abregu, 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 (CAMAI) 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 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. César Augusto Laguna Torres y el Dr. Miguel Ángel Guerra Cossío por su 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 la 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.

A mis amigos, quienes hicieron este recorrido más llevadero con su apoyo, palabras, risas y compañía. Gracias por estar presentes y por celebrar cada pequeño avance conmigo.

A mi directora y codirectora de tesis, la Dra. Mayra y la M.C. Xiomara, por su guía, dedicación y compromiso académico. Su orientación, conocimientos y paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo, así como para mi crecimiento profesional y académico.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                                                                                                               | Página    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                                                                          | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Planteamiento del problema. ....</b>                                                                                  | <b>3</b>  |
| <b>1.2. Justificación del estudio. ....</b>                                                                                   | <b>6</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES. ....</b>                                                                                         | <b>7</b>  |
| <b>2.1. La industria constructiva y el cemento Portland.....</b>                                                              | <b>7</b>  |
| 2.1.1. Composición del Cemento Portland. ....                                                                                 | 8         |
| 2.1.2. Fabricación del Cemento Portland y su Impacto Ambiental.....                                                           | 9         |
| 2.1.3. Proceso de hidratación. ....                                                                                           | 11        |
| <b>2.2. El vidrio: clasificación y su potencial como material sustituto.....</b>                                              | <b>12</b> |
| 2.2.1. Clasificación de los vidrios. ....                                                                                     | 13        |
| 2.2.2. El vidrio como sustituto del cemento Portland. ....                                                                    | 16        |
| <b>2.3. Nanociencia y nanotecnología en la construcción.....</b>                                                              | <b>21</b> |
| 2.3.1. Nanosílice.....                                                                                                        | 22        |
| 2.3.2. Nanotubos de Carbono.....                                                                                              | 24        |
| 2.3.3. Nanocompuestos. ....                                                                                                   | 26        |
| <b>2.4. Hipótesis.....</b>                                                                                                    | <b>29</b> |
| <b>2.5. Objetivos.....</b>                                                                                                    | <b>30</b> |
| 2.5.1. Objetivo general. ....                                                                                                 | 30        |
| 2.5.2. Objetivos específicos. ....                                                                                            | 30        |
| <b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>                                                                             | <b>32</b> |
| <b>3.1. Materiales de partida. ....</b>                                                                                       | <b>34</b> |
| <b>3.2. Desarrollo experimental.....</b>                                                                                      | <b>35</b> |
| 3.2.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.....                                                                             | 36        |
| 3.2.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.....                                                                           | 37        |
| 3.2.3. Etapa 3. Efecto del tiempo de agitación en propiedades mecánicas. ....                                                 | 39        |
| 3.2.4. Etapa 4. Morteros con sustituciones mayores: 30, 40 y 50%. ....                                                        | 41        |
| 3.2.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerzo de SiO <sub>2</sub> /NTC en morteros con diferentes porcentajes de sustitución. .... | 42        |
| <b>3.3. Técnicas de caracterización, pruebas y equipos. ....</b>                                                              | <b>44</b> |
| 3.3.1. Técnicas de caracterización.....                                                                                       | 45        |
| <b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS. ....</b>                                                                                           | <b>49</b> |
| <b>4.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.....</b>                                                                        | <b>49</b> |

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.....</b>                                                                             | <b>54</b>  |
| <b>4.3. Etapa 3. Efecto del tiempo de agitación en propiedades mecánicas. ....</b>                                                   | <b>62</b>  |
| <b>4.4. Etapa 4. Morteros con sustituciones mayores: 30, 40 y 50%.....</b>                                                           | <b>70</b>  |
| <b>4.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerzo de SiO<sub>2</sub>/NTC en morteros con<br/>diferentes porcentajes de sustitución. ....</b> | <b>94</b>  |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....</b>                                                                                          | <b>118</b> |
| <b>Conclusiones.....</b>                                                                                                             | <b>118</b> |
| <b>Recomendaciones.....</b>                                                                                                          | <b>119</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS CONSULTADAS.....</b>                                                                                   | <b>121</b> |

## LISTA DE TABLAS

| <b>Tabla</b>                                                                                                  | <b>Página</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Tabla I.</b> Tipos de vidrio.....                                                                          | 14            |
| <b>Tabla II.</b> Diseño experimental .....                                                                    | 34            |
| <b>Tabla III.</b> Composición química del cemento portland y el vidrio. ....                                  | 51            |
| <b>Tabla IV.</b> Resistencia a la compresión de morteros REF, VA, VP y VN a diferentes edades de curado. .... | 115           |
| <b>Tabla V.</b> Resistencia a la flexión de morteros REF, VA, VP y VN a diferentes edades de curado. ....     | 116           |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura                                                                                                                                                                  | Página |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Figura 1.</b> Fabricación del CP. ....                                                                                                                               | 9      |
| <b>Figura 2.</b> Evolución del calor durante el proceso de hidratación del CP.....                                                                                      | 11     |
| <b>Figura 3.</b> Etapas experimentales de la investigación.....                                                                                                         | 33     |
| <b>Figura 4.</b> Metodología, etapa 1.....                                                                                                                              | 37     |
| <b>Figura 5.</b> Metodología, etapa 2.....                                                                                                                              | 38     |
| <b>Figura 6.</b> Metodología, etapa 3.....                                                                                                                              | 39     |
| <b>Figura 7.</b> Pruebas mecánicas. ....                                                                                                                                | 40     |
| <b>Figura 8.</b> Metodología, etapa 4.....                                                                                                                              | 42     |
| <b>Figura 9.</b> Metodología, etapa 5.....                                                                                                                              | 44     |
| <b>Figura 10.</b> Análisis DTP de materias primas del vidrio y del cemento. ....                                                                                        | 50     |
| <b>Figura 11.</b> Difractograma de rayos X del cemento Portland y el vidrio.....                                                                                        | 52     |
| <b>Figura 12.</b> Micrografías de las materias primas: a) CP y b) Vidrio.....                                                                                           | 53     |
| <b>Figura 13.</b> Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: ICP y pH del vidrio. ....                                                             | 55     |
| <b>Figura 14.</b> Análisis FTIR de la activación mecánica del agua de vidrio en horas. ....                                                                             | 57     |
| <b>Figura 15.</b> Análisis DTP posterior a la activación mecánica del vidrio. ....                                                                                      | 58     |
| <b>Figura 16.</b> Micrografías de la activación mecánica.....                                                                                                           | 60     |
| <b>Figura 17.</b> Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: $R^3$ .....                                                                           | 61     |
| <b>Figura 18.</b> Micrografías de morteros, muestras con activación mecánica. ....                                                                                      | 63     |
| <b>Figura 19.</b> Calorimetría de morteros con vidrio con activación mecánica a diferentes tiempos; Flujo de calor y Calor acumulado. ....                              | 64     |
| <b>Figura 20.</b> Resistencia a compresión de muestras con diferentes tiempos de activación. ....                                                                       | 66     |
| <b>Figura 21.</b> Resistencia a flexión de muestras con diferentes tiempos de activación. ....                                                                          | 68     |
| <b>Figura 22.</b> XRD de muestra referencia a 7, 28, 90 y 180 días de curado.....                                                                                       | 71     |
| <b>Figura 23.</b> XRD de muestra con 20% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado. ....                                                                          | 72     |
| <b>Figura 24.</b> XRD de muestras con 30% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado. ....                                                                         | 73     |
| <b>Figura 25.</b> XRD de muestras con 40% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado.....                                                                          | 74     |
| <b>Figura 26.</b> XRD de muestras con 50% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado.....                                                                          | 75     |
| <b>Figura 27.</b> FTIR de las pastas con vidrio sin activación mecánica (VA) y vidrio con activación mecánica (VP) a 28 días de curado.....                             | 77     |
| <b>Figura 28.</b> FTIR de las pastas con vidrio sin activación mecánica (VA) y vidrio con activación mecánica (VP) a a) 90 días de curado y b) 180 días de curado. .... | 79     |
| <b>Figura 29.</b> Micrografías de muestras con sustitución de vidrio a 28 días. ....                                                                                    | 80     |
| <b>Figura 30.</b> Micrografías de muestras con sustitución de vidrio a 90 días. ....                                                                                    | 81     |
| <b>Figura 31.</b> Micrografías de muestras con sustitución de vidrio a 180 días. ....                                                                                   | 82     |
| <b>Figura 32.</b> Micrografías EDS de morteros VA y VP (20% y 30%) a diferentes tiempos de curado. ....                                                                 | 83     |

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 33.</b> Calorimetría de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VA;<br>Flujo de calor y calor acumulado. ....                             | 85  |
| <b>Figura 34.</b> Calorimetría de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VP;<br>Flujo de calor y calor acumulado. ....                             | 86  |
| <b>Figura 35.</b> Expansión de las muestras a 14 días donde a) VA y b) VP. ....                                                                               | 88  |
| <b>Figura 36.</b> Resistencia a la compresión de muestras a) VA y b) VP. ....                                                                                 | 90  |
| <b>Figura 37.</b> Resistencia a la flexión de muestras a) VA y b) VP. ....                                                                                    | 91  |
| <b>Figura 38.</b> XRD de los nanomateriales y el nanorefuerto. ....                                                                                           | 95  |
| <b>Figura 39.</b> Micrografías de materias primas; a) NTC, b) nSiO <sub>2</sub> y c) Nanorefuerto<br>NTC/SiO <sub>2</sub> . ....                              | 96  |
| <b>Figura 40.</b> Análisis DLS del agua con vidrio para dispersión del nanorefuerto. ....                                                                     | 98  |
| <b>Figura 41.</b> XRD de muestras de 20% y 30% de sustitución de vidrio con adición del<br>nanorefuerto a 7, 28, 90 y 180 días. ....                          | 100 |
| <b>Figura 42.</b> XRD de muestras de 40% y 50% de sustitución de vidrio con adición del<br>nanorefuerto a 7, 28, 90 y 180 días. ....                          | 101 |
| <b>Figura 43.</b> FTIR de muestras VN a 28 días de curado. ....                                                                                               | 103 |
| <b>Figura 44.</b> FTIR de muestras VN a 90 días de curado. ....                                                                                               | 103 |
| <b>Figura 45.</b> FTIR de muestras VN a 180 días de curado. ....                                                                                              | 104 |
| <b>Figura 46.</b> Micrografías de muestras con vidrio activado mecánicamente VN a 28<br>días. ....                                                            | 105 |
| <b>Figura 47.</b> Micrografías de muestras de vidrio activado mecánicamente VN a 90<br>días. ....                                                             | 106 |
| <b>Figura 48.</b> Micrografías de muestras de vidrio activado mecánicamente VN a 180<br>días. ....                                                            | 106 |
| <b>Figura 49.</b> Calorimetría de morteros con vidrio activado mecánicamente VN; a)<br>Flujo de calor y Calor acumulado, b) Acercamiento Flujo de calor. .... | 108 |
| <b>Figura 50.</b> Expansión de muestras VN a 14 días. ....                                                                                                    | 110 |
| <b>Figura 51.</b> Resistencia a la compresión de los morteros VN. ....                                                                                        | 111 |
| <b>Figura 52.</b> Resistencia a la flexión de los morteros VN. ....                                                                                           | 112 |

## NOMENCLATURAS

| <b>Símbolo</b>                                         | <b>Descripción</b>                                                              |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| CP                                                     | Cemento Portland                                                                |
| CO <sub>2</sub>                                        | Dióxido de Carbono                                                              |
| VSC                                                    | Vidrio sódico cálcico.                                                          |
| C <sub>3</sub> S                                       | Silicato tricálcico (Alita).                                                    |
| C <sub>2</sub> S                                       | Silicato dicálcico (Belita).                                                    |
| C <sub>3</sub> A                                       | Aluminato tricálcico (Celita).                                                  |
| C <sub>4</sub> AF                                      | Ferroaluminato tetracálcico (Ferrita).                                          |
| CSH                                                    | Silicato de Calcio Hidratado.                                                   |
| nSiO <sub>2</sub>                                      | Nanosílice.                                                                     |
| NTC                                                    | Nanotubos de Carbono.                                                           |
| SiO <sub>2</sub> /NTC                                  | Dióxido de Silicio y Nanotubos de Carbono.                                      |
| ONU                                                    | Organización de las Naciones Unidas.                                            |
| LGPGIR                                                 | Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.              |
| RSU                                                    | Residuos sólidos urbanos.                                                       |
| RME                                                    | Residuos de manejo especial.                                                    |
| RP                                                     | Residuos peligrosos.                                                            |
| SEMARNAT                                               | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.                              |
| INECC                                                  | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.                              |
| PIGECA                                                 | Plan Integral para la Gestión Estratégica de la Calidad del Aire en Nuevo León. |
| PM <sub>10</sub>                                       | Partículas de 10 µm o menores.                                                  |
| PM <sub>2.5</sub>                                      | Partículas de 2.5 µm o menores.                                                 |
| CANACEM                                                | Cámara Nacional del Cemento.                                                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | Óxido de Aluminio.                                                              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | Óxido de Hierro.                                                                |
| CANACEM                                                | Cámara Nacional del Cemento.                                                    |
| CaCO <sub>3</sub>                                      | Carbonato de Calcio.                                                            |
| MgCO <sub>3</sub>                                      | Carbonato de Magnesio.                                                          |
| C <sub>3</sub> A·CaSO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O | Monosulfatos.                                                                   |
| Ca(OH) <sub>2</sub>                                    | Hidróxido de Calcio/Portlandita.                                                |
| ASTM                                                   | Sociedad Americana de Pruebas de Materiales.                                    |
| MAA                                                    | Materiales Activados Alcalinamente.                                             |
| CASH                                                   | Aluminato de Calcio Hidratado.                                                  |
| NASH                                                   | Aluminato de Sodio Hidratado.                                                   |
| NaOH                                                   | Hidróxido de Sodio.                                                             |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                       | Silicato de Sodio.                                                              |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                        | Carbonato de Sodio.                                                             |
| RAS                                                    | Reacción álcali-sílice.                                                         |
| Na <sub>2</sub> O                                      | Óxido de Sodio.                                                                 |

| <b>Símbolo</b>  | <b>Descripción</b>                                                               |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| R <sup>3</sup>  | Rapid, Relevant and Reliable. Reactividad del material puzolánico.               |
| DTP             | Distribución de tamaño de partículas.                                            |
| XRF             | Fluorescencia de rayos X.                                                        |
| XRD             | Difracción de rayos X.                                                           |
| SEM             | Microscopía electrónica de barrido.                                              |
| ICP             | Espectrometría de plasma acoplado inductivamente.                                |
| pH              | Potencial de hidrogeno.                                                          |
| FTIR            | Fluorescencia infrarroja por transferencia de Fourier                            |
| IC              | Calorimetría isotérmica.                                                         |
| DOE             | Diseño de experimentos.                                                          |
| VA              | Mortero con vidrio agregado, sin activación mecánica.                            |
| VP              | Mortero con vidrio agregado, con activación mecánica.                            |
| VN              | Mortero con vidrio agregado, con activación mecánica y adición del nanorefuerzo. |
| CPC             | Cemento Portland compuesto.                                                      |
| OH <sup>-</sup> | Grupo hidroxilo.                                                                 |
| RAS             | Reacción álcali-sílice.                                                          |
| DLS             | Dispersión dinámica de luz.                                                      |

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.**

En el 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, directamente a las actividades constructivas. 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 (CO<sub>2</sub>) [1].

Uno de los enfoques más eficaces para reducir la huella de CO<sub>2</sub> asociada al sector constructivo es la disminución del consumo del CP mediante la sustitución parcial por recursos alternativos, tales como subproductos industriales o materiales reciclados como la ceniza volante, la escoria de alto horno, el humo de sílice y residuos plásticos o vidrio [1]. Debido a que el cemento es el principal responsable de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los sistemas cementantes, su sustitución representa una alternativa importante para el desarrollo de materiales más sostenibles.

En este contexto, el vidrio de desecho destaca como un material reciclable disponible en grandes volúmenes, cuyo destino final suele ser el depósito en vertederos debido a su carácter no biodegradable, lo que genera impactos ambientales asociados a la contaminación del aire, agua y suelo. En el presente trabajo se propone la utilización de un vidrio sódico-cálcico (VSC) como material sustituto del CP en mezclas de mortero, aprovechando su composición química rica en Calcio y Sílice, similar a la del CP. Esta

similitud permite su incorporación en el sistema cementante sin interferir en las fases principales del cemento tales como alita ( $C_3S$ ), belita ( $C_2S$ ), celita ( $C_3A$ ) y ferrita ( $C_4AF$ ), contribuyendo así a la reducción del contenido de cemento y del impacto ambiental asociado [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]. El CSH se organiza en láminas o nanoestructuras con espesores de 1 a 5 nm que se agrupan en partículas o redes con dimensiones inferiores a 100 nm, siendo los responsables de la densificación de la matriz y del desarrollo de las resistencias mecánicas [4]. 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 nanosílice ( $nSiO_2$ ) 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 llevó 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 adicionó un nanorefuerzo compuesto de dióxido de Silicio y nanotubos de Carbono ( $SiO_2/NTC$ ) con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del mortero, tales como su resistencia a compresión y flexión. Además de estos objetivos principales, se realizaron análisis exhaustivos de la microestructura resultante, evaluando cómo fue alterada la disposición interna y el comportamiento del mortero en el

nivel microscópico por la integración de los nanomateriales. De esta forma, se buscó comprender en profundidad los diversos cambios en la composición del mortero los cuales influyeron 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 [5]. De acuerdo con un informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el sector constructivo consume un 40% de toda la energía, la extracción de hasta un 30% de las materias primas en el entorno y el 25% de los residuos sólidos generados provienen de diversas actividades ligadas con la construcción [1]. En 2022, las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la industria de la construcción representaron el 37% a nivel mundial, superando las 10 gigatoneladas. Únicamente, en México, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaron en 2023 un 4.54% respecto a 2022, convirtiéndose en uno de los países más contaminantes [6].

Con base en lo dispuesto en Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los residuos se definen como materiales o productos que se desechan, ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso y que requieren un tratamiento o disposición final. Estos se clasifican en tres grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) desempeña un papel fundamental al establecer regulaciones para la gestión de los residuos urbanos [7].

Junto a esto, la 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 [8].

Según el documento “Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2020” de la SEMARNAT, la generación de residuos sólidos en México alcanzó 0.944 kg/hab/días equivalentes a 120,128 t/día. Estos residuos se dividen en tres categorías: Susceptibles de aprovechamiento (31.55%), orgánicos (46.42%) y otros (22.03%). Dentro de la fracción “susceptibles a aprovechamiento” se encuentra el vidrio, tanto transparente como de color, que representa aproximadamente un 4.4% del total de residuos [7,9].

Por su parte, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) indica que los RSU constituyen un factor determinante en la contaminación ambiental del país y, dentro de esta fracción, el vidrio tiene una presencia de 6.6% a nivel nacional [10].

De igual manera y, 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  $10\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y partículas menores o iguales a  $2.5\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ), 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 2018, la industria del cemento y la cal generaron 224.5 T de  $\text{PM}_{10}$  y 140.4 T de  $\text{PM}_{2.5}$  mientras que la industria del vidrio generó 285.3 T de  $\text{PM}_{10}$  y 195 T de  $\text{PM}_{2.5}$  en ese mismo año [11].

Tomando en 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 de los agregados y del CP. En estos estudios se logra incorporar con éxito el vidrio como sustituto parcial del CP, mostrando como es que esta mejora o mantiene un comportamiento similar a un mortero convencional cuando el vidrio es molido y se incorpora en tamaños de partículas menores a  $75\mu\text{m}$  [1] con activadores agregados a la mezcla los cuales terminan siendo perjudiciales para el medio ambiente, como hidróxido de Sodio o Potasio, silicatos y carbonatos [12].

De esta manera, aunque el uso del vidrio como sustituto del CP ha sido ampliamente investigado, aún persisten limitaciones en su desempeño mecánico, particularmente a altos porcentajes de sustitución, donde se ha observa una disminución de las propiedades del material. Si bien, diversos estudios han evaluado diferentes niveles de reemplazo, los resultados indican que el incremento en el contenido de vidrio suele afectar negativamente el comportamiento del sistema cementante.

Ante ello, el presente trabajo se planteó determinar **¿de qué manera la incorporación de un nanorefuerzo de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  podría favorecer el desempeño de un mortero con sustitución parcial del CP por VSC activado mecánicamente, particularmente en contenidos elevados de vidrio, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas y microestructurales?**

## **1.2. Justificación del estudio.**

El cuidado del medio ambiente y la búsqueda de la sostenibilidad han pasado a ser prioridades fundamentales en la actualidad. 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. Estos estudios han sido evaluados de forma individual, siendo que la investigación de las variables (vidrio y nanorefuerzo) todavía es un área en desarrollo. Partiendo de que los estudios previos se han enfocado en el análisis separado de cada material, el presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un procedimiento para la preparación de un mortero donde se incluya una activación mecánica al vidrio que, posteriormente, permita la unión de este material a una matriz cementante y la adición de un nanorefuerzo de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$ .

Con este método se pretende proporcionar un beneficio a la sociedad en donde se busca disminuir el consumo y promover la reutilización de materiales que contribuyen fuertemente a la contaminación ambiental. A su vez, se busca generar un punto de partida para nuevas investigaciones con el nanorefuerzo como adición y el desarrollo de más materiales como sustitutos parciales del CP. De igual manera, se busca generar un producto el cual sea utilizado como material de revestimiento, acabados o en paneles prefabricados.

## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.**

### **2.1. La industria constructiva y el cemento Portland.**

La industria de la construcción ha estado ampliamente vinculada con las necesidades humanas. Históricamente, las técnicas constructivas surgieron en un contexto donde la mano de obra era económica y los materiales representaban un mayor costo. Con el paso del tiempo, esta relación se invirtió. Este cambio se vio influenciado en ciertos períodos, impulsando el desarrollo de nuevas técnicas y materiales que permitan reducir el gasto en mano de obra. Desde los años sesenta hasta la actualidad, los costos de la construcción han ido creciendo, en gran parte debido al aumento de la demanda [13].

Dentro de esta industria, uno de los principales materiales es el cemento siendo aquel que puede generar una mezcla de uso universal que posee ciertos elementos y características que lo hacen singular frente a una gran variedad de materiales presentes en la naturaleza [14].

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 una agregados como arena o grava [15].

La industria del cemento en México es una de las más importantes en cuanto a su capacidad productiva, sin embargo, a lo largo de los años ha tenido varias fluctuaciones con respecto a sus niveles de producción. Entre 1940 a 1980, la industria paso de contar con una capacidad instalada de 574 millones a 17.02 millones de toneladas métricas, con únicamente seis grupos empresariales: Cementos Tolteca, Cementos Anáhuac, Cementos Mexicanos, Cruz Azul, Guadalajara y San Luis Mining [16].

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 [17]. Posteriormente, en 2022, según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), se utilizaban 4,200 millones de toneladas de CP [18].

#### 2.1.1. Composición del Cemento Portland.

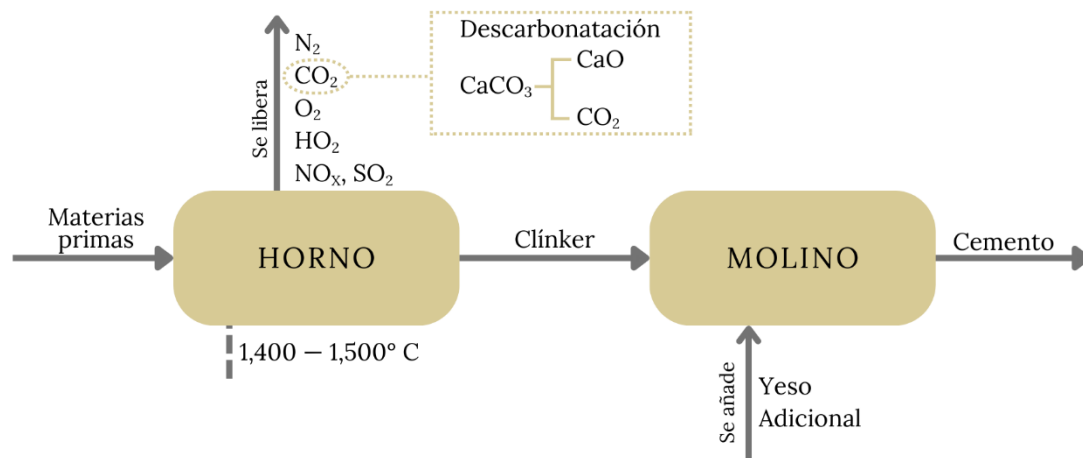
El CP tiene diversos componentes, siendo el principal el Clinker. Este componente se obtiene por la sinterización de una mezcla homogénea de materias primas que, generalmente, son caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y algunos óxidos como óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros en pequeñas cantidades. Posteriormente, esta mezcla se calienta a altas temperaturas lo cual promueve la generación de nuevos compuestos hasta que aparece el Clinker [19].

El Clinker del CP es un material hidráulico que debe estar constituido por las siguientes fases:

- Silicato Tricálcico/Alita ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  /  $\text{C}_3\text{S}$ ) – 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/Belita ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  /  $\text{C}_2\text{S}$ ).
- Ferrito Aluminato Tetracálcico/Ferrita ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  /  $\text{C}_4\text{AF}$ ).
- Aluminato Tricálcico/Celita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  /  $\text{C}_3\text{A}$ ).

### 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 mayores que  $1,400^\circ\text{C}$  dando lugar al clíinker el cual, molido y con una adición de yeso, constituye el CP, tal como se muestra en la figura 1 [20].



**Figura 1.** Fabricación del CP.

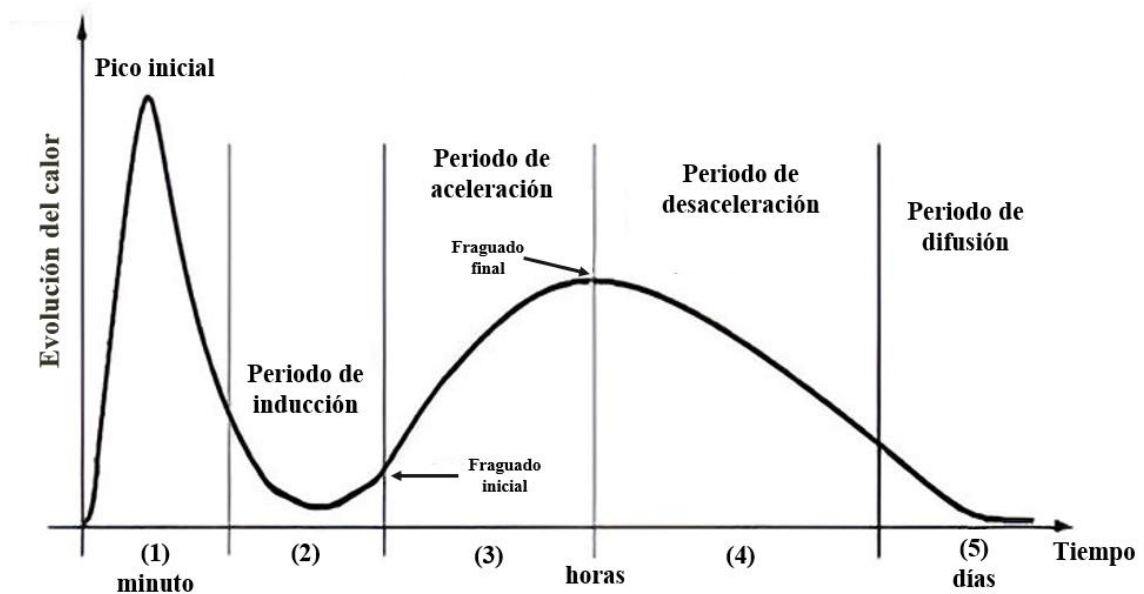
Las materias primas, previamente molidas, son precalentadas mediante una serie de gases de combustión. A medida que la temperatura alcanza los 550 °C comienzan a descomponerse compuestos como el carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y el carbonato de Magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ), liberando  $\text{CO}_2$  y formando óxidos como  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$ . Entre los 900 y 1200° C se inicia la formación de  $\text{C}_2\text{S}$  y, después, entre 1200 y 1280 °C se forman los componentes como  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$ . Una vez que el clinker alcanza la temperatura máxima, cerca de 1450 °C, se enfría a unos 100 °C mediante aire ambiente y, posteriormente, se traslada al molino para tritararlo y mezclarlo con yeso y otros aditivos [21].

La producción de CP se considera una de las actividades industriales con mayor generación de emisiones de  $\text{CO}_2$  en el mundo. Se estima que se emiten aproximadamente 900 kg de  $\text{CO}_2$  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  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$ , cuyas reacciones químicas generan los óxidos necesarios para la formación del clinker [21].

### 2.1.3. Proceso de hidratación.

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

El proceso de hidratación 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. Este proceso se divide en cinco etapas, como se muestra en la figura 2 [22].



**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, la cual comienza 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 [23].

- Etapa 3. – Periodo de aceleración.

La reacción se reinicia y, como el gel CSH es termodinámicamente estable, 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 ( $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ).

- Etapa 5. – Periodo de difusión.

La microestructura del gel CSH se vuelve más densa y tanto la portlandita como 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 [24,25].

La fabricación del vidrio se hace en un reactor de fusión en donde se calienta una mezcla que, normalmente, consiste en arena silícea (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 1000C. Al sacarlo del reactor, el vidrio adquiere una rigidez que permite darle forma y manipularlo [26].

#### 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 [26]. En la mayoría de las estructuras de los vidrios inorgánicos, el formador de red principal es el  $\text{SiO}_2$  [24].

**Tabla I.**

TIPOS DE VIDRIO [26].

| Elementos | Tipos de vidrio y su composición química (%) |         |              |        |
|-----------|----------------------------------------------|---------|--------------|--------|
|           | Sódico – Cálculo                             | 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 I presenta algunos de los tipos de vidrios más comunes y los porcentajes aproximados de sus principales componentes químicos, lo que permite comparar las variaciones en su composición elemental. Estos datos son relevantes para analizar el potencial del vidrio como material sustituto del CP, particularmente con respecto al contenido de óxidos de Sílice y Calcio los cuales influyen en el comportamiento del material dentro de sistemas cementantes.

#### 2.2.1.1. Vidrio Sódico Cálculo.

También llamado vidrio soluble, está formado por Sílice, Sodio y Calcio principalmente. La Sílice constituye la materia prima básica del vidrio al formar la red estructural principal, mientras que el Sodio actúa como fundente al reducir la cantidad de enlaces cruzados entre el Oxígeno y Silicio, lo que permite facilitar el proceso de fusión,

y el Calcio aporta estabilidad química al sistema, debido a que sin este el vidrio sería altamente soluble al entrar en contacto con el agua [25–27].

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: ventanas, botellas, utensilios de cocina, frascos, focos, entre otros [27].

#### 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 [26].

#### 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 utilizados en utensilios de cocina para hornos y en material de laboratorio [27].

#### 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 y revestimientos de hornos, entre otros [27].

#### 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 e hidróxido de Calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), reaccionan y forman compuestos con propiedades aglutinantes a temperatura ambiente [28]. 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  $\text{Ca(OH)}_2$ , un subproducto de la reacción del cemento en agua, para formar compuestos con propiedades cementantes [28].

##### 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, los cuales son 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 CSH). Los MAA tienen la ventaja de ser obtenidos a temperatura ambiente a partir de precursores como la ceniza volante, escorias metalúrgicas, vidrio y humo de sílice, entre otros [29].

Los MAA se pueden clasificar en aquellos con alto o bajo contenido de Ca; los que presentan un alto contenido de éste 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  $\text{SiO}_2(\text{vidrio}) + \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  [30].

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 [31]. 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. [32].

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 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) son los activadores más utilizados para la preparación de MAA; para la producción de ambos, especialmente del  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , se consume una alta cantidad de energía lo cual resulta en emisiones de  $\text{CO}_2$ . La producción de estos activadores requiere la fusión de carbonato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y  $\text{SiO}_2$  en un horno a temperaturas de hasta  $1500^\circ\text{C}$  [33].

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

Una de las estrategias más utilizadas en la actualidad para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  producidas por la industria cementera es el reemplazo parcial de del CP en las mezclas

cementantes por materiales alternativos. El uso de estos materiales, que terminan siendo subproductos industriales o residuos, permiten disminuir el contenido de cemento sin afectar necesariamente el desempeño del material, lo cual ayuda a la reducción del consumo de los recursos naturales. 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 [28] la actividad puzolánica del VSC mejora cuando se tienen en tamaños de partícula pequeños debido a que se genera una superficie de contacto mayor lo que permite mayor capacidad de reacción entre el  $\text{Ca(OH)}_2$  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  $75\ \mu\text{m}$ . A su vez, ayudará a la formación del gel CSH que se une con el  $\text{Ca(OH)}_2$ , este último se forma por la hidratación del cemento y el agua gracias a la alta actividad puzolánica y contenido de  $\text{SiO}_2$  [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 [34] realizaron una sustitución de VSC de desecho con tamaños de partícula de  $10\ \mu\text{m}$ , 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, años después, en 2017, [35] volvieron a analizar la sustitución del CP por VSC con los mismos porcentajes mencionados anteriormente, aumentando a tamaños de partícula de 75  $\mu\text{m}$  y con la adición de un superplastificante con base en 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 disminuyó un 10%.

Por otra parte, Weison y colaboradores [36] 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 pase 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  $\mu\text{m}$  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 resistencia a 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 [37], en 2022, sintetizaron diversos tipos de vidrio con diferente contenido de óxido de Sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y determinaron que, mientras más contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  se tuviese, se obtendría una mejor disolución. Según los investigadores, una disolución inicial del vidrio promueve el aumento en el pH. Sin embargo, un exceso de contenido de Na puede generar una RAS que provoque expansiones perjudiciales [37].

Por otro lado, Kuijiao y colaboradores [32], 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; el caso del VSC, con tamaños de partícula de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ , demostró ser el más reactivo y, al sustituir un 50% de CP por este, se obtuvo una resistencia a compresión de 20 MPa, siendo el que presentaba mejores propiedades.

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, considerando que en la mayoría de los estudios se ha utilizado activadores.

Según lo estudiado, en general, los porcentajes menores que el 30% con tamaños de partículas finas (10 a 75  $\mu\text{m}$ ) son aquellos que muestran una mejoría en la resistencia a compresión y flexión. Por otro lado, también demuestran la importancia del uso 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 intervalo 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 [38].

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 [39]. 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:  $n\text{SiO}_2$ , nano-óxido de Titanio (nano- $\text{TiO}_2$ ), nano-Hierro (nano- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), nano-Alúmina (nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), nanoarcilla, NTC y nano fibras de Carbono (FNC) [39].

### 2.3.1. Nanosílice.

Las  $n\text{SiO}_2$  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  $\text{C}_3\text{S}$  y ser más eficaces que el humo de Sílice [39].

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  $n\text{SiO}_2$  tiene una actividad puzolánica relativamente alta que ayuda a la formación de geles CSH adicionales. De igual manera, al tener partículas más pequeñas que las del cemento, permite mejorar el empaquetamiento de estas [40].

De entre algunos de los estudios realizados con respecto a la  $n\text{SiO}_2$  sobresale el de Rishav y colaboradores [41] donde se comparó el uso de la micro Sílice y la  $n\text{SiO}_2$  en morteros, evaluando cómo es que estos materiales podrían afectar las propiedades del material cementante. Referente a la  $n\text{SiO}_2$  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  $n\text{SiO}_2$ , un total de 15, 19, 22 y 21% la resistencia a compresión con respecto a un mortero convencional a 28 días de curado y se determinó que el mejor porcentaje a utilizar era el de 1.0%.

Junto a esto, Ramezaniapour y colaboradores [42] realizaron una investigación sobre el efecto sinérgico de la  $n\text{SiO}_2$  y las puzolanas naturales en estructuras de morteros simples, específicamente para la  $n\text{SiO}_2$  se utilizaron reemplazos de 2, 3 y 4% con respecto

al cemento. Utilizando un nanomaterial de 15 nm, mezclado por 15 min en agua en un ultrasonido y con la adición de un superplastificante a los morteros, la  $n\text{SiO}_2$  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.

Hamdy y colaboradores [43] realizaron un estudio sobre las propiedades químicas y físico mecánicas de morteros con micro sílice y  $n\text{SiO}_2$ . El nanomaterial contaba con un tamaño de partícula promedio de 15 nm y un área superficial de  $50 \text{ m}^2/\text{g}$ . Dentro del estudio se realizaron sustituciones de CP por  $n\text{SiO}_2$  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  $n\text{SiO}_2$  se comporta tanto como un relleno como un activador que promueve la reacción puzolánica.

En 2017, Yu y colaboradores [40] evaluaron el efecto de la  $n\text{SiO}_2$  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 un mortero convencional, mostró un incremento al añadir la  $n\text{SiO}_2$ , 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 sería el realizado por Aly y colaboradores [44] quienes analizaron el comportamiento de la  $n\text{SiO}_2$  en compuestos con vidrio de desecho. El vidrio contaba

con un tamaño de 75  $\mu\text{m}$  y se realizaron muestras con 20 y 40% de sustitución por vidrio y 3% de  $\text{nSiO}_2$ . A 28 días, se obtuvieron resultados favorables, para resistencias a compresión y flexión, sobresaliendo la sustitución del 20% con un aumento del 32% y 48% respectivamente.

El estudio de la  $\text{nSiO}_2$  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 representan una de las opciones 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 [39].

Tal como con la  $\text{nSiO}_2$ , los NTC han sido estudiados a lo largo de los últimos años, por ejemplo, Shaowei y colaboradores [45] 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 éstos fue de 10  $\mu\text{m}$ . Concluyeron que el porcentaje óptimo a utilizar era el de 0.05%, debido a que era el que mostraba mejores resistencias a la compresión y la flexión, obteniendo 2.4% y 9.6%, respectivamente, a 28 días.

Asimismo, Cerro-Prada y colaboradores [46] 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 tamaño de 2  $\mu\text{m}$ , 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.

Tanvir y colaboradores [47] estudiaron diferentes porcentajes de adición de NTC en un intervalo del 0 al 0.5%. Los NTC utilizados contaban con un diámetro de 10 a 20 nm y se utilizó un superplastificante a base de policarboxilato. Los resultados demostraron que las resistencias a compresión y flexión aumentaban, a 28 días. Los resultados demostraron que una dosificación de 0.1% presentó un mejor desempeño en resistencia a flexión en comparación con 0.3%, alcanzando un incremento del 20% respecto al mortero control, mientras que una dosificación de 0.3% mostró mejorías del 12.5%. En contraste, en la resistencia a compresión se observó un comportamiento inverso, debido a que la dosificación de 0.3% alcanzó valores superiores a los de 0.1%, con incrementos del 56% y 50%, respectivamente, en comparación con el mortero de control.

El análisis de las investigaciones sobre la adición de  $n\text{SiO}_2$  y NTC en morteros permite evidenciar que estos componentes mejoran notablemente las propiedades mecánicas del material. De igual manera, estos permiten determinar el tamaño de partícula y las diversas proporciones que se podrían utilizar para la optimización de estas. De igual forma, se logra demostrar que la incorporación de dispersantes es crucial para maximizar el rendimiento de estos materiales en la mezcla. En el presente trabajo, se busca emplear un nanorefuerso compuesto por estos materiales sin la utilización de un dispersante, 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. Nanocompuestos.

Los nanocompuestos a base de cemento aprovechan los ventajas de los nanomateriales, generando que las investigaciones al respecto comiencen a ir en aumento. Nanomateriales como la  $n\text{SiO}_2$  y NTC son los que permiten obtener mejoras a las características de los materiales; ambos materiales pueden rellenar poros y disminuir el diámetro de los poros. Así mismo, la  $n\text{SiO}_2$  puede promover la generación de productos de hidratación más finos los cuales permitan una mejora entre la unión de la matriz cementante con los NTC [48] y, en este caso, del vidrio. La efectividad de estos materiales depende, en gran medida, de la naturaleza del nanomaterial, su método de síntesis y de su adecuada dispersión en interacción con la matriz cementante.

Los métodos de producción de nanomateriales se clasifican desde distintos criterios. De acuerdo con el enfoque de construcción del material, pueden distinguirse los procesos de *top-down* (procesos de molienda) y *bottom-up* (crecimiento de partículas mediante

condensación y/o coagulación); mientras que, considerando el medio de reacción empleado, los métodos se agrupan en técnicas de fase gaseosa y de fase líquida o coloidal. El método *bottom-up* es el más común en la fabricación de nanomateriales y se pueden llevar en fase gaseosa, líquida o coloidal [49].

#### 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 de vapor químico*, debido a que se lleva a cabo en reactores o en hornos [49].

Entre los estudios reportados, destaca la investigación realizada por Raza y colaboradores [48] donde se utilizaron NTC y nSiO<sub>2</sub>, con tamaños de 10–30  $\mu\text{m}$  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 nSiO<sub>2</sub>, 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 nSiO<sub>2</sub> y la de 0.3% NTC y 5% de nSiO<sub>2</sub> mejoraban la resistencia a compresión y flexión en un 17.2% y 52% respectivamente.

Por igual, Varisha y colaboradores [50] estudiaron el efecto de un nanocompuesto de NTC, con tamaños de 1–5  $\mu\text{m}$  y 10–20  $\mu\text{m}$ , y nSiO<sub>2</sub>, de 12 nm, en morteros. Para lograr una dispersión homogénea de los nanomateriales, fueron sometidos a una sonicación durante 20 minutos, adicionando un 0.4% de superplastificante de sulfato de Magnesio

(MgSO<sub>4</sub>). Con una dosificación de 0.3% de NTC y 1% de nSiO<sub>2</sub> 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 [49].

Mendoza-Reales y colaboradores [3] realizaron un estudio enfocado en el uso de NTC y nSiO<sub>2</sub>, 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 nSiO<sub>2</sub>. Se obtuvieron mejoras en las resistencias a compresión, con respecto al mortero de control, siendo que la adición del nanocompuesto, a 28 días, permitió un aumento del 16%; mientras que para resistencia a flexión se disminuyó un 7%, esto con los porcentajes máximos de adición.

En 2022, Mishra [51] analizo el efecto de dispersar NTC y nSiO<sub>2</sub> 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 nSiO<sub>2</sub> amorfa, con intervalos 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 nSiO<sub>2</sub> utilizó 1 y 2%. La mezcla de 0.05% y 0.1% NTC con 2% de nSiO<sub>2</sub> 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 nSiO<sub>2</sub> demostró un aumento de 12%.

A partir de estas investigaciones se evidencia que los nanomateriales, en específico, los NTC y nSiO<sub>2</sub>, como un nanocompuesto representan una estrategia prometedora para la mejora de las propiedades mecánicas en sistemas cementantes, siempre que se logre una adecuada dispersión de este. El análisis de distintos enfoques de síntesis y aplicación de estos nanomateriales permite establecer un punto de partida para el presente trabajo, al resaltar los beneficios potenciales y los retos asociados a su incorporación conjunta. En este sentido, la información recopilada proporciona una guía para la elaboración del nanocompuesto y el establecimiento de estrategias de dispersión adecuadas para su correcto desempeño como nanorefuerzo en morteros.

## **2.4. Hipótesis.**

Mediante la utilización de un VSC molido, activado mecánicamente, y un nanorefuerzo de SiO<sub>2</sub>/NTC se podrá preparar un mortero con una sustitución de hasta el 50% del CP por VSC sin utilizar activadores alcalinos ni dispersantes, el cual presentará un comportamiento mecánico comparable al de un mortero convencional de CP.

## **2.5. Objetivos.**

### **2.5.1. Objetivo general.**

Evaluar el efecto del uso de VSC reciclado y activado mecánicamente como sustituto parcial del CP hasta un 50% y la adición de un nanorefuerto de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  en 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 nanorefuerto, mediante la evaluación de cambios en el pH, la disociación de iones metálicos y los resultados de la prueba  $R^3$ , 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

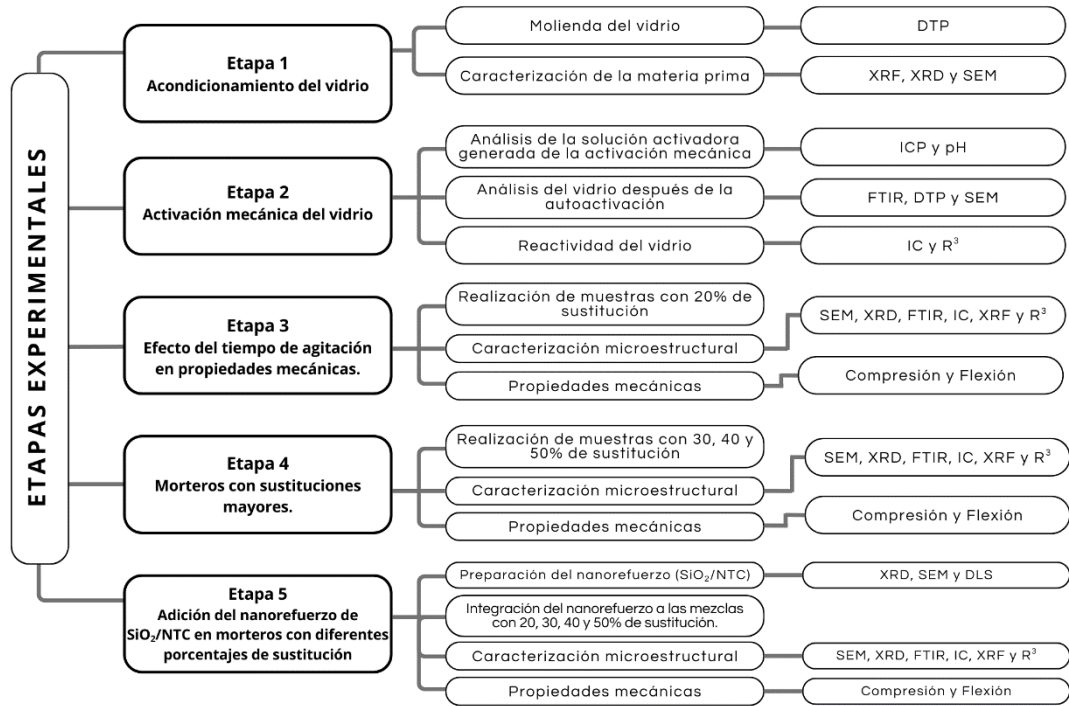
propósito de establecer la relación entre el pretratamiento aplicado al vidrio y la cantidad incorporada como material cementante suplementario.

4. Estudiar el efecto del reforzamiento generado por la incorporación de 0.025% de nanorefuerzo  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  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**

Con el objetivo de lograr los propósitos establecidos para esta investigación, se diseñó una metodología experimental que permitirá evaluar las características mecánicas y microestructurales de los morteros con diferentes porcentajes de sustitución y la adición de el nanorefuerto de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$ . Este capítulo aborda a fondo los procesos necesarios, junto con los métodos, para cada una de las etapas planteadas para la obtención de diversos criterios 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.

En el presente trabajo se realizó diferentes sustituciones de CP por VSC (20%, 30%, 40 y 50%) con la adición de un 0.025% de nanorefuerto de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  con una relación a/c base del 0.49. Considerando esto y los objetivos planteados en esta investigación, se plantearon las etapas experimentales mostradas en la figura 3.



**Figura 3.** Etapas experimentales de la investigación.

De igual manera, en la tabla II se muestra el diseño de experimentos (DOE) realizado para cada uno de los morteros, considerando como factores la sustitución de vidrio de 20%, 30%, 40% y 50% y la adición del 0.025% de nanorefuerto, considerándose como un factor fijo en el DOE.

**Tabla II.**

**DISEÑO EXPERIMENTAL.**

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

**NOTA.** - C es el mortero convencional; VA es el mortero con vidrio agregado, sin activación mecánica; VP es el mortero con vidrio agregado, donde el vidrio pasó por el proceso de activación mecánica y VN el mortero con vidrio agregado, con el proceso de activación mecánica, y la adición del nanorefuerto.

### 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 donde proviene cada uno de los materiales 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 siguientes elementos, dentro de su respectivo porcentaje: del 70 a 75% de sílice, del 10 a

15% de CaO+MgO y de 12 a 16% de Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O según la ISO-12775 [52] 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. De igual manera, su contenido de sodio será de gran importancia para la generación del ambiente alcalino para su posterior uso como activador y dispersante. El vidrio fue molido, con el fin de obtener una buena distribución y tamaño de partículas similares al CP.

- Nanotubos de Carbono.

Los NTC utilizados dentro de la presente investigación son del tipo multipared, con radicales del grupo hidroxilo (OH<sup>-</sup>) de 20 a 30 nm de diámetro y de 10 a 20 µm de longitud con una pureza del 95%, siendo de la marca US Research Nanomaterials Inc.

- Nanosílice.

La nSiO<sub>2</sub> utilizada es una nanopartícula de dióxido de Silicio de 20 a 30 nm con una pureza mayor que el 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.**

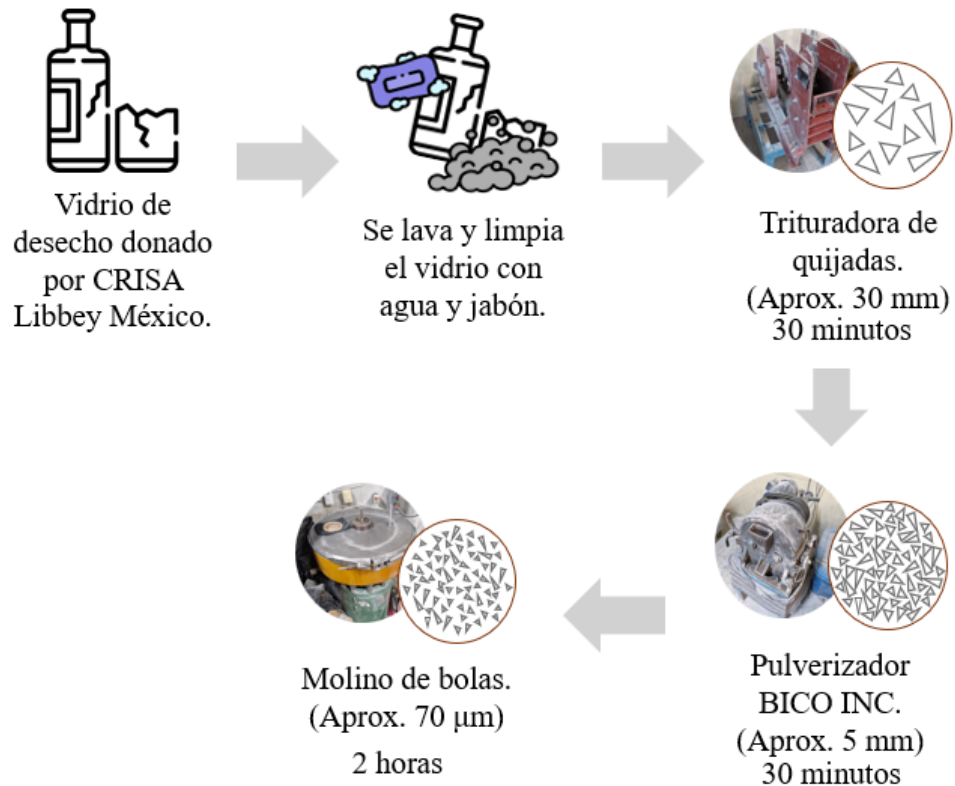
En esta sección se describirá a fondo el desarrollo experimental por etapas de la investigación, desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la dosificación

óptima para los morteros, siendo ésta la cual presente los mejores resultados con respecto a sus resistencias mecánicas.

#### 3.2.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.

La primera etapa por realizar se centró en el acondicionamiento del vidrio de desecho; 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 de este en tres etapas, que incluyen la molienda en dos trituradoras y, posteriormente, un molino de bolas, hasta obtener un tamaño de partícula menor a 70  $\mu\text{m}$ . Este proceso se explica en la figura 4, donde se utilizó una trituradora de quijadas, 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  $\mu\text{m}$ . Para el molino de bolas se realizaron dos cargas, de aproximadamente, 8 kg cada una.



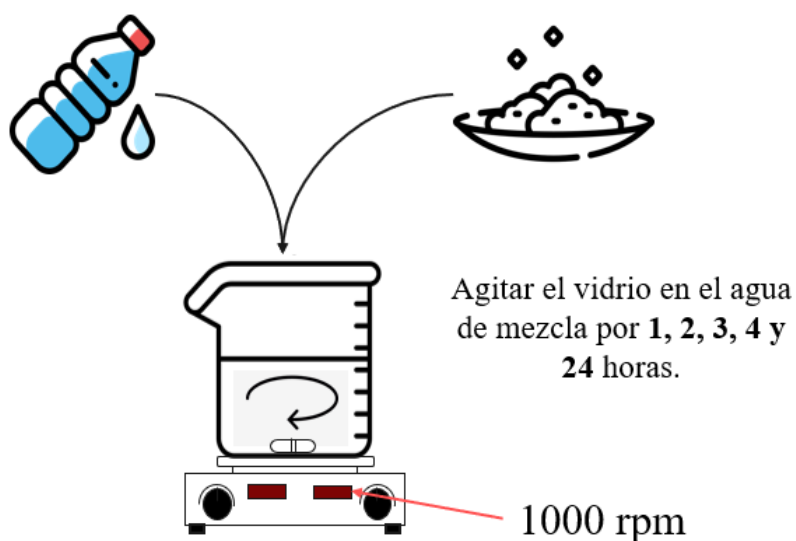
**Figura 4.** Metodología, etapa 1.

Posteriormente 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.

### 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. Esta se realizó añadiendo la cantidad de vidrio, necesaria para la sustitución, en el agua de mezcla (relación a/c= 0.49),

como se observa en la figura 5. Consecutivamente 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 para conocer la distinción entre el comportamiento del material con el paso del tiempo.

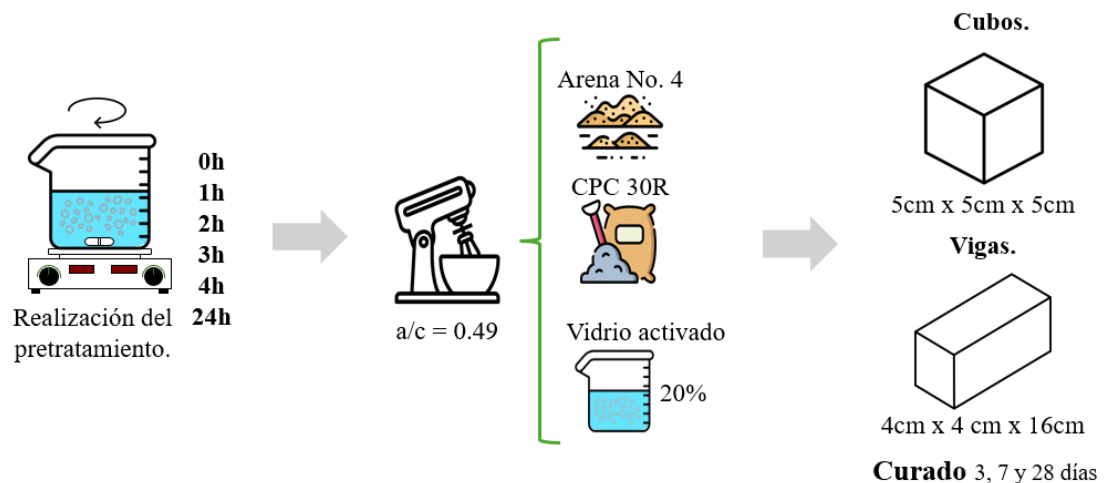


**Figura 5.** Metodología, etapa 2.

Para analizar el comportamiento del material se realizaron las pruebas espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP), potencial de hidrogeno (pH), fluorescencia infrarroja por transferencia de Fourier (FTIR), SEM, DTP, calorimetría isotérmica (IC) y reactividad del material puzolánico ( $R^3$ , Rapid, Relevant and Reliable [53]) con el fin de analizar los cambios y poder determinar el mejor tiempo de activación a utilizar para sustituciones mayores. Este fin se unifica con la siguiente etapa.

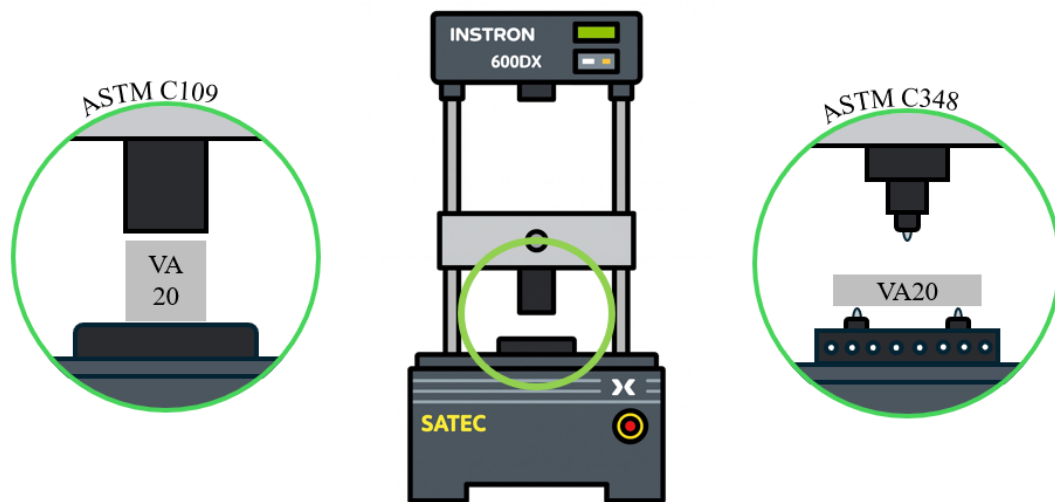
### 3.2.3. Etapa 3. Efecto del tiempo de agitación en propiedades mecánicas.

Se elaboraron morteros con un 20% de sustitución, con la finalidad de analizar el efecto de la activación mecánica del vidrio en las propiedades mecánicas. Para esto, se mantuvo la relación a/c de 0.49 y, siguiendo la normativa ASTM C305 [54], se realizaron los morteros. Esta norma dicta que se debe colocar el agua de mezcla (en este caso con el vidrio y después de su correspondiente tiempo de activación) y el cemento en la olla, se mezcla por 30 segundos a velocidad baja para después agregar la arena y mezclar por otros 30 segundos. Al terminar el tiempo, el equipo se apaga y se limpian las paredes de la olla para dejar reposar la mezcla durante 1 minuto con 15 segundos antes de volver a encender el equipo y mezclar durante 1 minuto. Al terminar con la mezcla, se coloca en moldes para su posterior utilización para determinar la resistencia a compresión y flexión dictadas por normativa, 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 [55], se elaboraron cubos de 50x50x50 mm los cuales serán curados en agua durante 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 aplica una carga de 90 kg/s y se calcula la resistencia a compresión, al dividir carga entre área de la sección.



**Figura 7.** Pruebas mecánicas.

Por otro lado, para la flexión de los morteros, se aplicó la normativa ASTM C348 [56], donde se elaboraron vigas de 40x40x160 mm las cuales fueron curadas en agua durante 3, 7 y 28 días. Al pasar el curado, las vigas fueron medidas y colocadas en la prensa, considerando 3 puntos, antes de aplicar una carga de 1 mm/s y, después, calcular su resistencia a flexión.

De igual manera, las muestras con 28 días de curado fueron analizadas por la técnica SEM para evaluar su comportamiento. El analizar los resultados obtenidos en la etapa 2 y

3 determinaron el tiempo de activación óptimo para la obtención de mejores propiedades en el mortero.

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

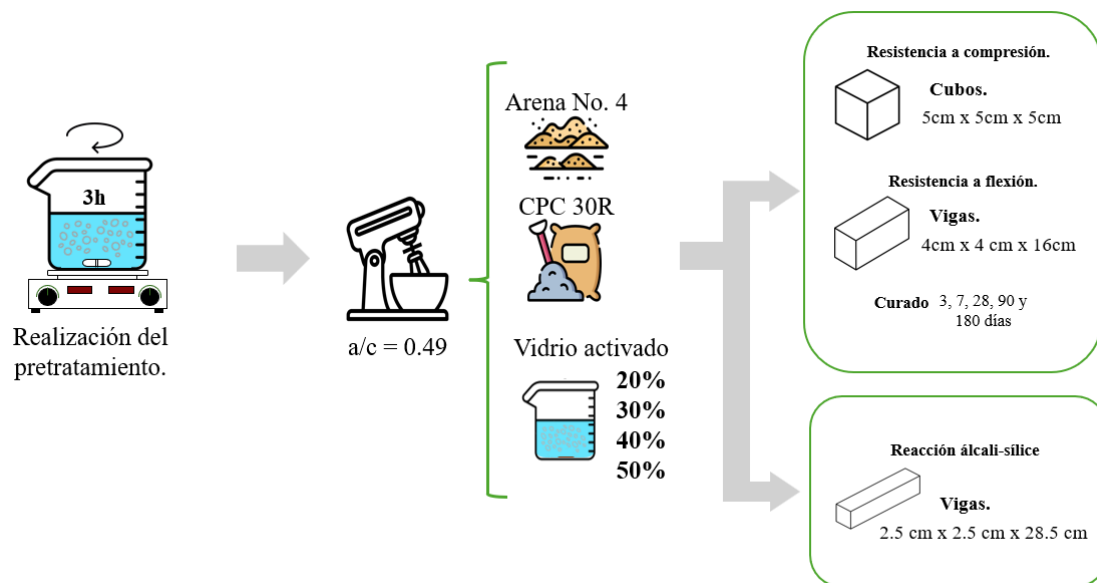
Para la etapa 4, se sometió el vidrio a una activación mecánica en la cantidad de horas determinada en la etapa anterior para, posteriormente, elaborar los morteros con 30%, 40% y 50% de sustitución, siguiendo las normativas antes mencionadas. Este proceso es ilustrado en la figura 8.

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 IC 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.

De igual manera, se realizó un análisis de reacción álcali-sílice (RAS) a las muestras a 14 días, según lo dictado en la normativa ASTM C1567 [57] la cual establece un método acelerado para la evaluación del RAS en morteros mediante la medición de la expansión lineal de especímenes elaborados con materiales sustitutos. Este permitió identificar la susceptibilidad del material a generar expansiones en ambientes altamente alcalinos, lo cual permitió analizar la compatibilidad y estabilidad de los morteros, debido al alto contenido de sílice incorporado por la adición del vidrio.

Se elaboraron vigas de 25x25x285 mm las cuales fueron curadas en un contenedor sellado con agua, dentro de un horno a una temperatura de  $80 \pm 2$  °C, durante 1 día, previo a la realización de la medición final. Posteriormente, las muestras se colocaron en un contenedor sellado con una solución de NaOH y se mantuvieron en el horno bajo la misma condición de temperatura durante 14 días. Las mediciones se realizaron en intervalos de 4, 7 y 14 día, utilizando un comparador de longitud.



**Figura 8.** Metodología, etapa 4.

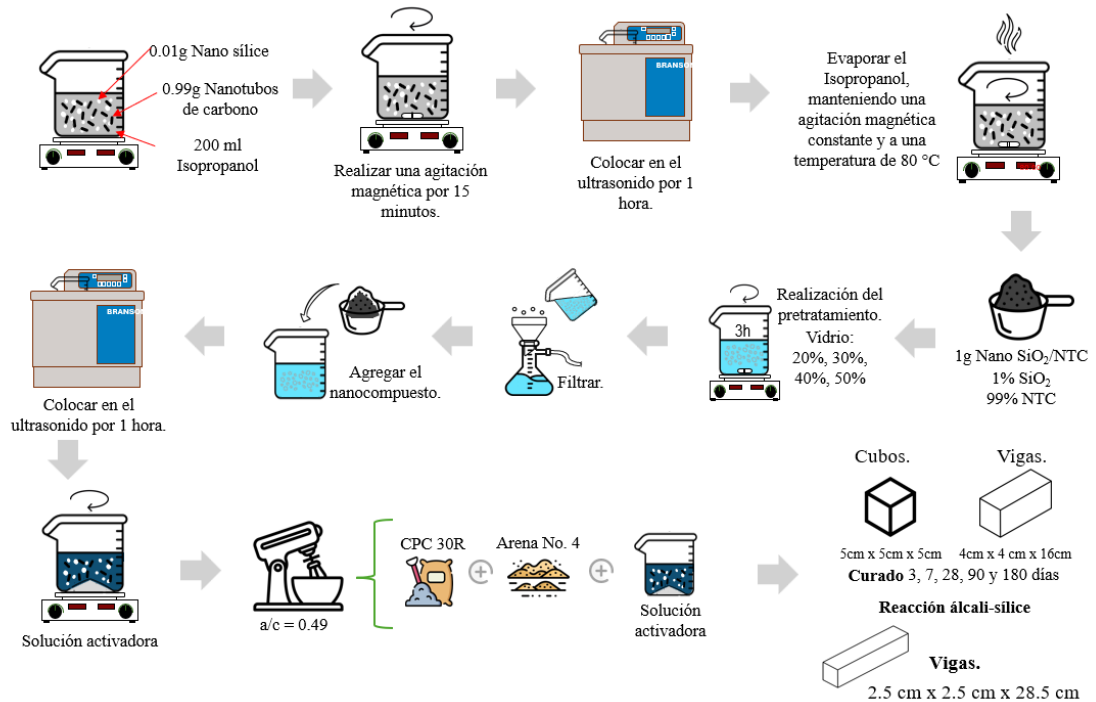
3.2.5. Etapa 5. Adición del nanorefuerto de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  en morteros con diferentes porcentajes de sustitución.

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 nanorefuerto a realizar.

Después de esto se procedió a realizar el nanorefuerzo preparando una mezcla de 0.01 g de  $\text{nSiO}_2$  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 colocó en el ultrasonido por 1 h. Por último, se evaporó el isopropanol a  $80^\circ\text{C}$  bajo agitación magnética constante, obteniendo 1 g de nanorefuerzo de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  con un 1%  $\text{nSiO}_2$  y 99% NTC. Este nanorefuerzo obtenido fue analizado por medio de XRD, XFR y SEM.

Una vez concluido lo anterior, se adicionó el nanorefuerzo en las mezclas del mortero. Para esto se llevó a cabo la activación mecánica del vidrio, con sus respectivos porcentajes de sustitución, y se procedió a filtrar. Al agua obtenida se le añadió el 0.025% de nanorefuerzo y se colocó en el ultrasonido durante 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 durante 3, 7, 28, 90 y 180 días, antes de realizar las pruebas de resistencia a la compresión y la 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, RAS y SEM. De igual manera, el agua fue analizada, mediante dispersión dinámica de luz (DLS), sin el vidrio, con el vidrio y agregando el nanorefuerto.



**Figura 9. Metodología, etapa 5.**

### 3.3. Técnicas de caracterización, pruebas y equipos.

En este apartado describe las técnicas de caracterización y los ensayos realizados para el análisis de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material. El correcto análisis determinó la mejor dosificación y la continuación de cada una de las fases.

### 3.3.1. Técnicas de caracterización.

Las técnicas de caracterización a lo largo de la investigación incluyen: XRD, XRF, FTIR, SEM, DTP, IC, ICP, DLS, pH y R<sup>3</sup>. Estas mismas se describirán a continuación:

- Difracción de rayos X.

Esta prueba permitió identificar las fases cristalinas que presentes en los diversos materiales, así como su zona amorfa, de manera preliminar. De igual manera, con esta técnica se pudo determinar si la adición de vidrio como sustituto generó un comportamiento diferente en las mezclas con respecto a sus fases presentes, algún desplazamiento de sus picos de difracción o si se generó algún cambio en su cristalinidad. El equipo utilizado es un difractómetro de rayos X marca Malvern PANalytical Empyrean. Para las muestras se utilizó un intervalo de  $2\theta$  de  $10^\circ$  a  $80^\circ$  y un tamaño de paso de 0.02.

Para realizar la identificación de las fases presentes en los materiales se utilizó el software HighScore Plus.

- Fluorescencia de rayos X.

La prueba XRF permitió obtener la cuantificación de diversos compuestos con base en óxidos que se encuentren presentes. Esta prueba se utilizó dentro de la primera etapa para poder establecer la cuantificación elemental de las materias primas utilizadas, así como en la última etapa para identificar los cambios entre las mismas, lo cual permite confirmar los resultados obtenidos por la XRD. El equipo de XRF utilizado es de la marca PANalytical Epsilon 3-XL, el cual opera en una atmósfera inerte con Nitrógeno para evitar la contaminación de las muestras.

- Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier.

La técnica FTIR permitió analizar las materias primas y las pastas del cemento, lo cual fue útil para la identificación de los 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, analizó cualquier cambio en sus productos de hidratación. El equipo con el que se trabajó es un espectrofotómetro infrarrojo por transformado de Fourier marca Shimadzu modelo IRTracer-100.

- Microscopía electrónica de barrido.

El SEM se utilizó para conocer la morfología que presentan los materiales, además de que por medio del análisis elemental semicuantitativo se comprueba la distribución de los elementos en las fases. Esta técnica se empleará en los materiales de partida y, posteriormente, será utilizado para determinar la buena incorporación del vidrio en la matriz del mortero. El equipo es un microscopio electrónico de barrido de la marca JEOL JSM-6510LV con electrones secundarios a 20kV equipado con una sonda de dispersión de rayos X (EDS). Se realizan observaciones de morfología utilizando magnificaciones de 30, 50, 100, 500, 1000 y 2000 aumentos para los morteros. Mientras que, para los nanomateriales, se utilizaron magnitudes de 7500, 20000, 30000, 50000 y 100000 aumentos.

- Análisis de distribución de tamaño de partículas.

La técnica analizó la distribución de tamaños de partículas de los materiales de partida, lo cual ayudó a distinguir entre el cemento y el vidrio. Estos resultados confirmaron si el vidrio contaba con tamaños de partícula similares

al cemento para poder plantear una posible relación con una alta reactividad y un potencial como material sustituto. Para esta técnica se utilizará un Microtrac S3500 Particle Size Analyzer.

- Calorimetría isotérmica.

La técnica IC se evaluó 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 la cinética de hidratación y así comparar las mezclas contra una pasta tradicional. Se utilizó 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 acoplado inductivamente.

La prueba ICP permitió cuantificar la presencia de elementos en las muestras. En este caso, la prueba se empleó 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 fueron de gran importancia para determinar el tamaño de las partículas y la distribución de éstas. 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 Hidrogeno.

El análisis del pH se realizó 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.

- Reactividad del material puzolánico.

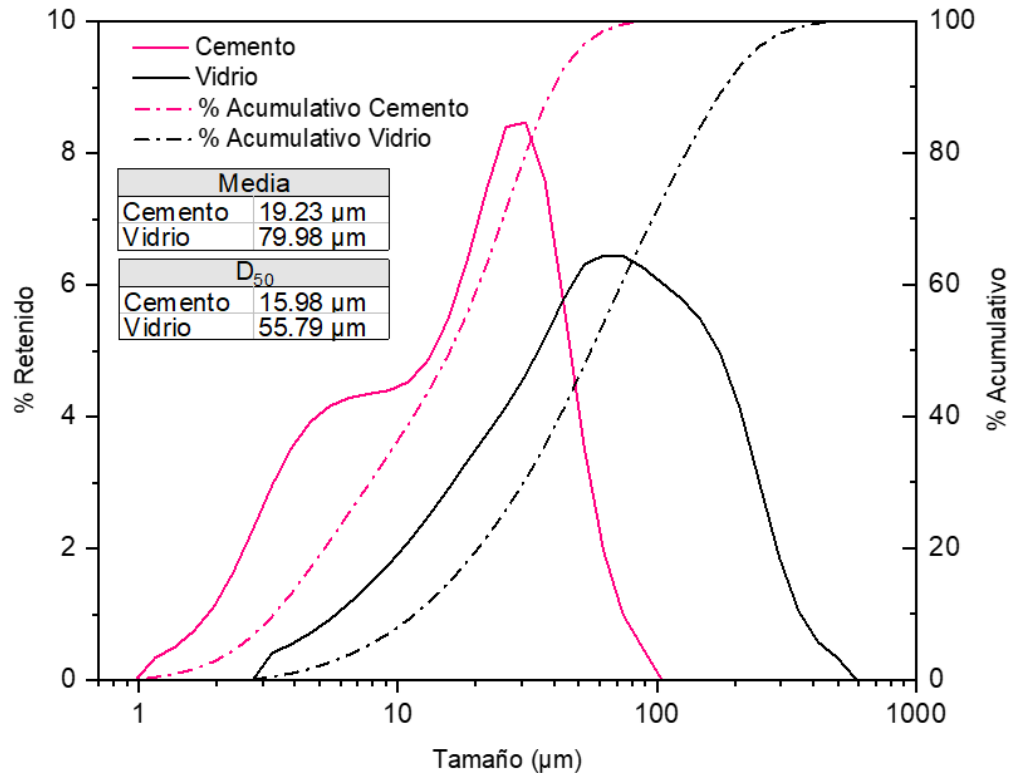
La presente técnica, utilizada en la etapa 2 y 4, buscando analizar cómo es que el vidrio, con sus diferentes etapas de activación, reaccionó con la portlandita en condiciones controladas. Estos resultados fueron un factor importante para determinar si el vidrio utilizado tenía actividad puzolánica o si es que solo actuó 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.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS.**

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en la presente investigación. En este caso, cada uno de los resultados serán discutidos en la etapa experimental correspondiente, siguiendo el orden propuesto en el capítulo anterior.

### **4.1. Etapa 1. Acondicionamiento del vidrio.**

El primer paso realizado fue la molienda del vidrio, lo cual le permitió aumentar su reactividad y, al mismo tiempo, tener partículas más finas que le permitieron incorporarse mejor con la matriz cementante, al tener partículas similares a las del CP. 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  $\mu\text{m}$  y 55.79  $\mu\text{m}$ , respectivamente, tal como se muestra en la figura 10.



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

En esta figura se observó que el tamaño de las partículas varió entre los materiales, siendo que el tamaño del VSC se presentó entre los intervalos de 3 a 600  $\mu\text{m}$ , con una media de 79.98  $\mu\text{m}$ ; comparado con el CP que su distribución se encuentra en un rango de 1 a 100  $\mu\text{m}$  con una media de 19.23  $\mu\text{m}$ , demostrando que el tamaño de partículas menores es del CP.

Siguiendo el proceso de caracterización, se realizó el análisis XRF para el vidrio y el 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 los óxidos presentes en ambos materiales.

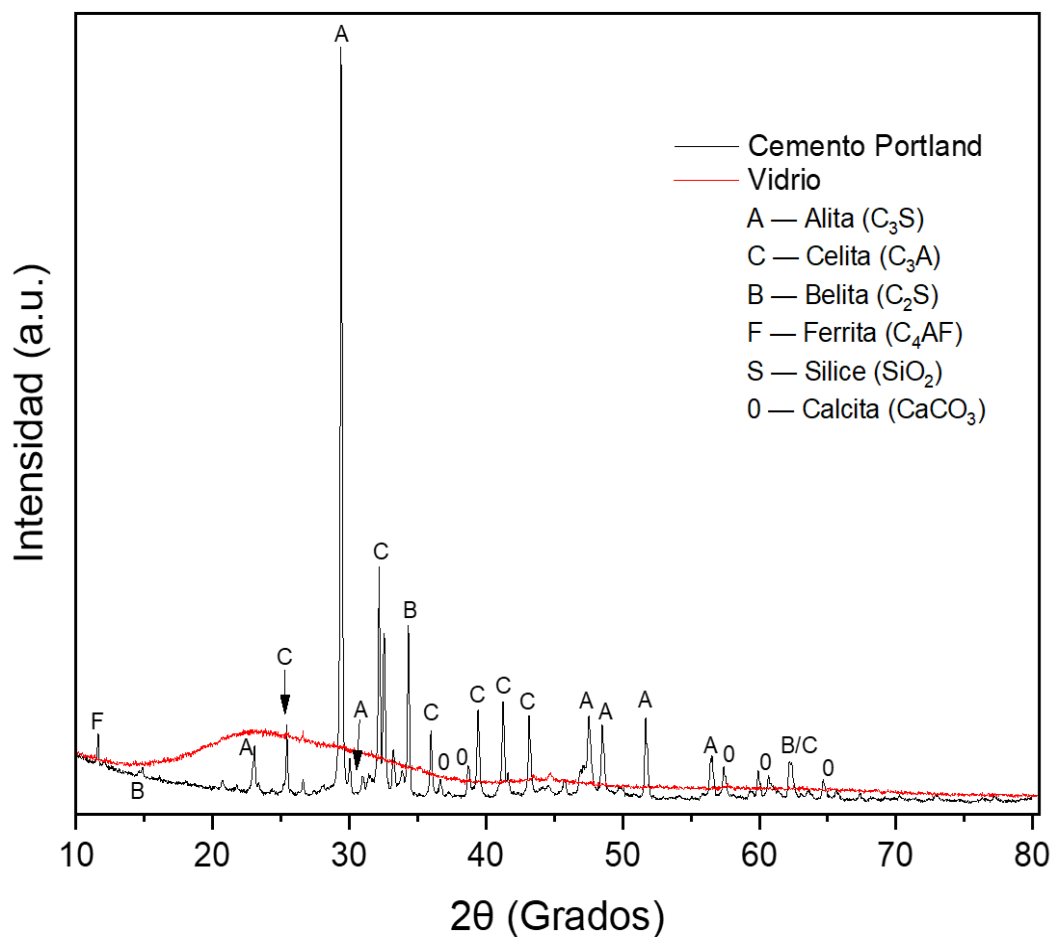
**Tabla III.****COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND Y EL VIDRIO.**

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

Con estos resultados se demuestra que los materiales de partida cumplieron la composición química adecuada para ser utilizados según lo establecido en la ASTM C150 [58], para cementos, y la ISO-12775 [52], para vidrios, ya que los principales componentes se encuentran dentro de los rangos permitidos por cada normativa.

En particular, el vidrio presentó los porcentajes característicos del VSC, con altos contenidos de SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O y CaO, mientras que el CP no excede los límites normativos para su empleo en sistemas cementantes. Esta composición del VSC favorece su reactividad en medios alcalinos, al permitir su disolución parcial y el suministro de sílice disponible para la formación de geles CSH, contribuyendo así a su comportamiento puzolánico cuando se incorpora como sustituto parcial del CP [59].

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

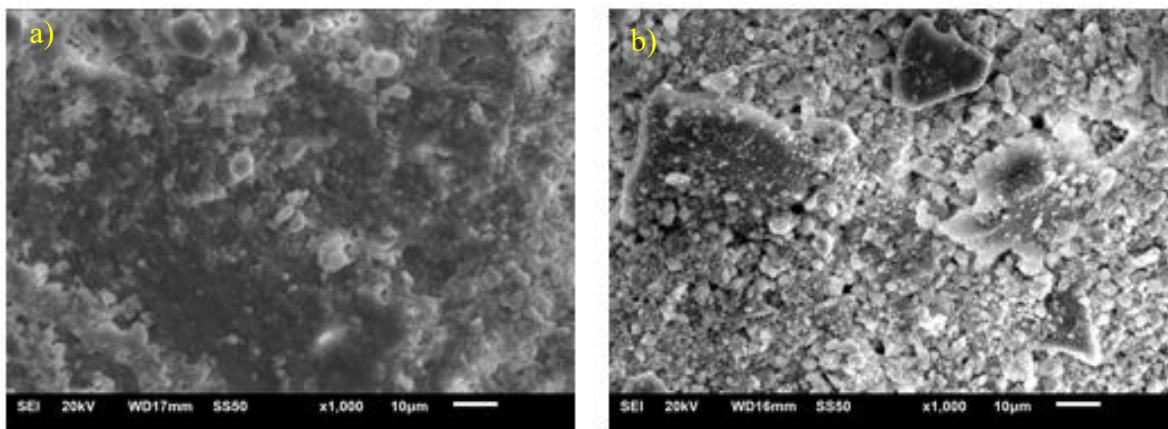


**Figura 11.** Difractograma de rayos X del cemento Portland y el vidrio.

En la figura anterior se muestra el difractograma del CP donde se identificaron las fases  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  y  $CaCO_3$  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 [60]. De igual manera, se muestra el patrón característico de un vidrio, en el

cual no se identifican picos atribuidos a fases cristalinas, observándose únicamente un halo de difracción amplio en el intervalo de  $20^\circ$  y  $30^\circ$  ( $2\theta$ ), el cual es asociado a la naturaleza amorfa de la fase vítrea [61].

Asimismo, con los análisis SEM a los materiales de partida se puede observar la morfología de cada uno de éstos. El análisis de la morfología es importante debido a que en la siguiente etapa el vidrio pudo llegar a tener algún cambio en esta propiedad por la activación realizada. Tal como se observa en la figura 12, en el caso del CPC (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 entre cada una de estas. Estas observaciones del vidrio confirman los resultados obtenidos en el análisis DTP, que a pesar de la molienda se mantienen partículas ligeramente grandes.



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

## **4.2. Etapa 2. Activación mecánica del vidrio.**

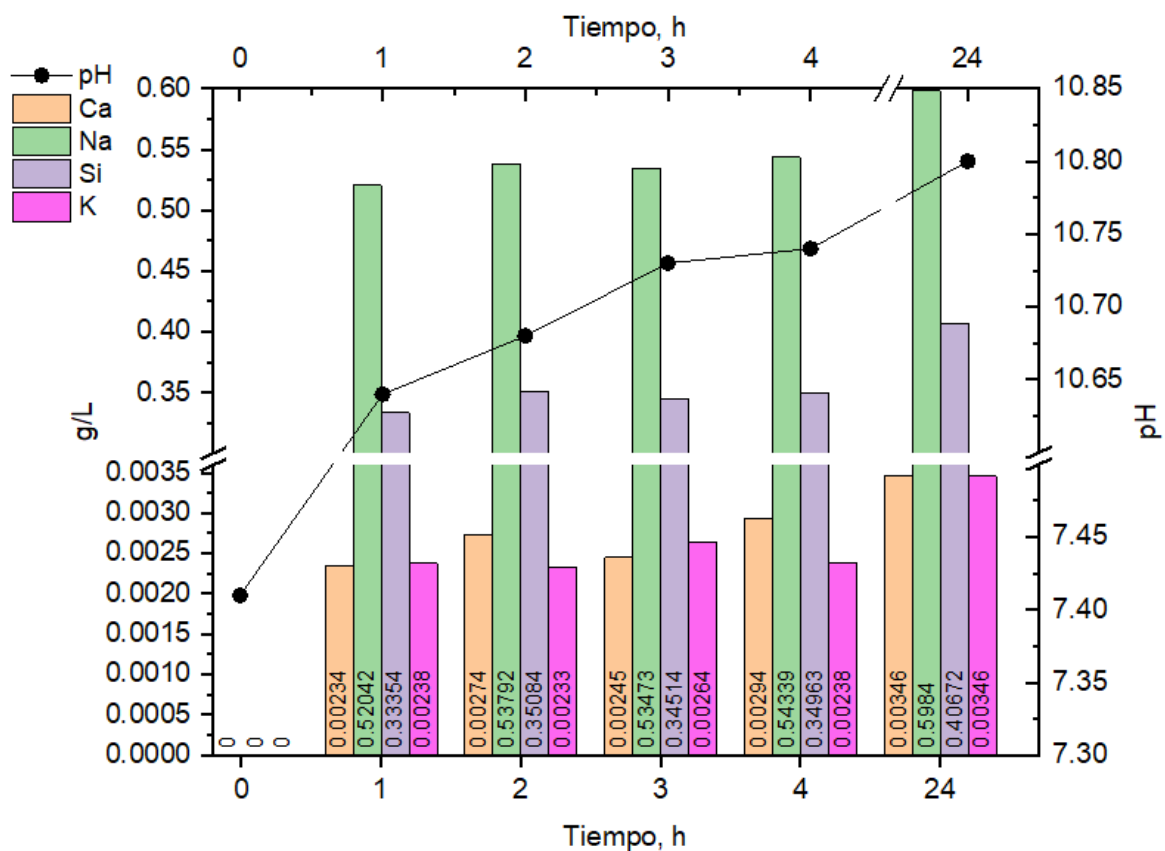
Con el objetivo de establecer el tiempo óptimo para la activación mecánica del vidrio, se llevó a cabo un conjunto de análisis al agua con vidrio, enfocándose principalmente en determinar la activación mecánica que modifique el material y cómo esto mejoró sus propiedades.

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 con pH básico, tales como el Potasio y el Sodio [62].

Las reacciones de los vidrios en soluciones acuosas se describen, generalmente, mediante dos mecanismos principales: el intercambio de iones alcalinos en la superficie con iones hidrógeno ( $H^+$ ) e hidronio ( $H_3O^+$ ) 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 [63].

Por otro lado, la técnica ICP se empleó para determinar la composición elemental de los materiales analizados. Esta técnica permitió identificar y cuantificar los elementos presentes, ofreciendo perfiles químicos que facilitaron la comparación y la evaluación de posibles cambios en el material [64].

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.



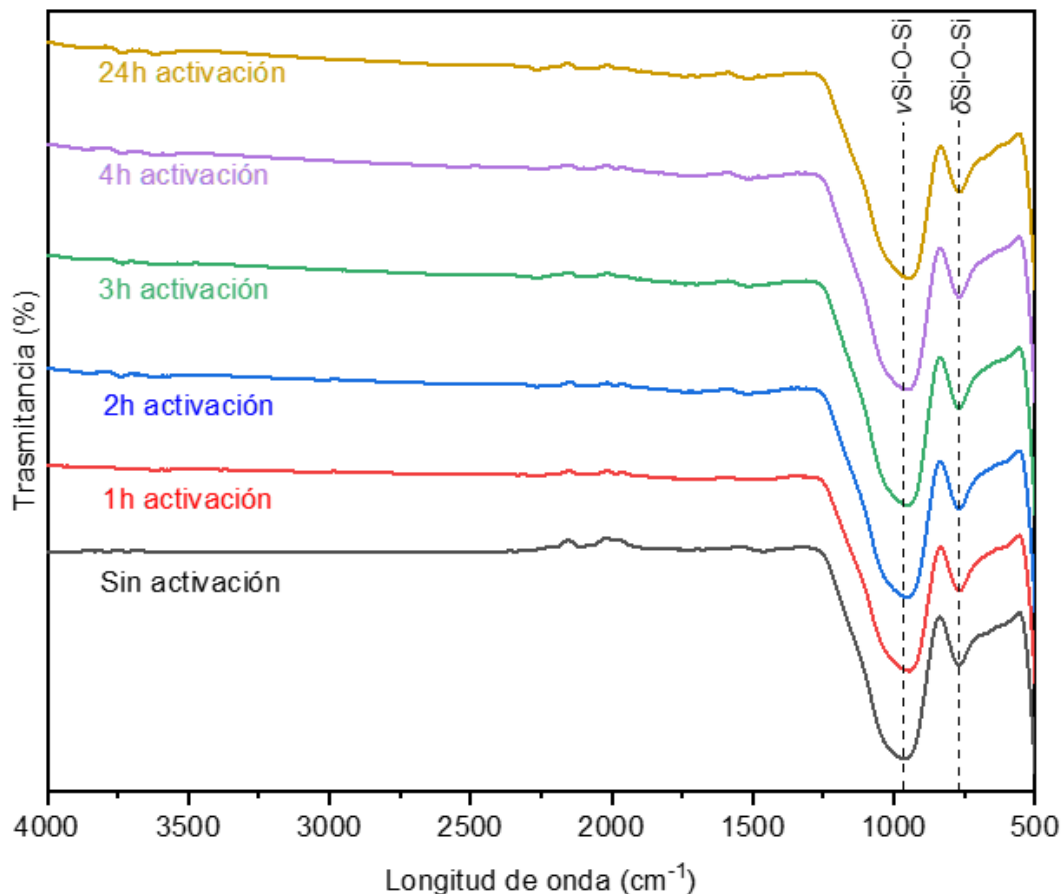
**Figura 13.** Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: ICP y pH del vidrio.

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. Se observa una mayor liberación de iones  $\text{Na}^+$  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 [32].

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 [65].

Los movimientos vibracionales se clasifican de acuerdo con el tipo de desplazamiento que inducen en los enlaces, distinguiéndose principalmente vibraciones de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión, también denominadas de estiramiento (*stretching*, en inglés), corresponden a la elongación y contracción del enlace, mientras que las vibraciones de flexión, conocidas igualmente como deformación (*bending*), implican una variación en el ángulo del enlace sin un cambio aparente en su longitud [66].

El espectro FTIR de la sílice muestra sus picos representativos a aproximadamente a los 1050 y 470  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente al grupo funcional Si-O-Si. La banda de 1050  $\text{cm}^{-1}$  ha sido la más estudiada de todas, siendo esta correlacionada a las modificaciones en la estructura del vidrio [65]. 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.



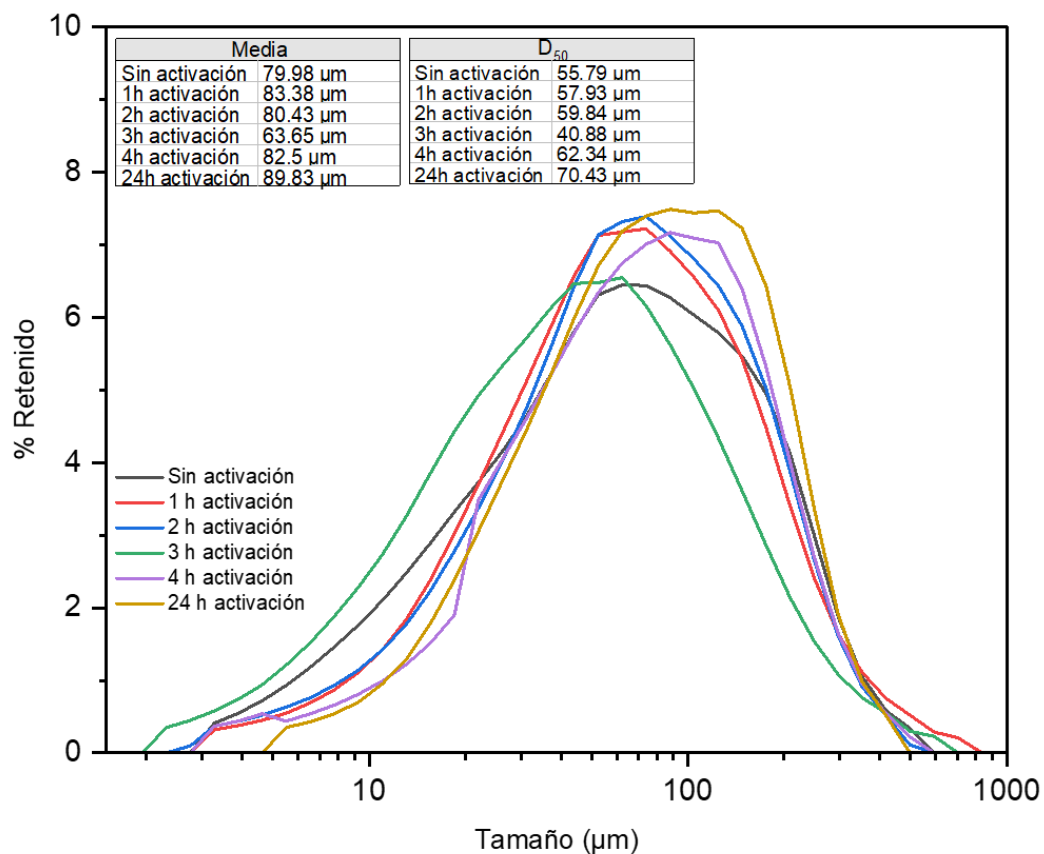
**Figura 14.** Análisis FTIR de la activación mecánica del agua de vidrio en horas.

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 cercana a  $1100\text{ cm}^{-1}$  hacia menores números de onda [65]. El VSC generalmente presenta dos tipos de bandas de absorción típicas, es decir una banda de estiramiento asimétrico Si–O–Si a  $1050\text{ cm}^{-1}$  y una de deformación a entre los  $700$  y  $800\text{ cm}^{-1}$  [67].

En el caso de los espectros analizados, demostraron que la activación mecánica no generó un cambio significativo en la estructura del vidrio. Se mantuvieron iguales en todas las horas analizadas y se representaron las bandas características, antes mencionadas, del grupo funcional Si-O-Si en  $1050$  y  $800\text{ cm}^{-1}$ .

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. [68].

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.

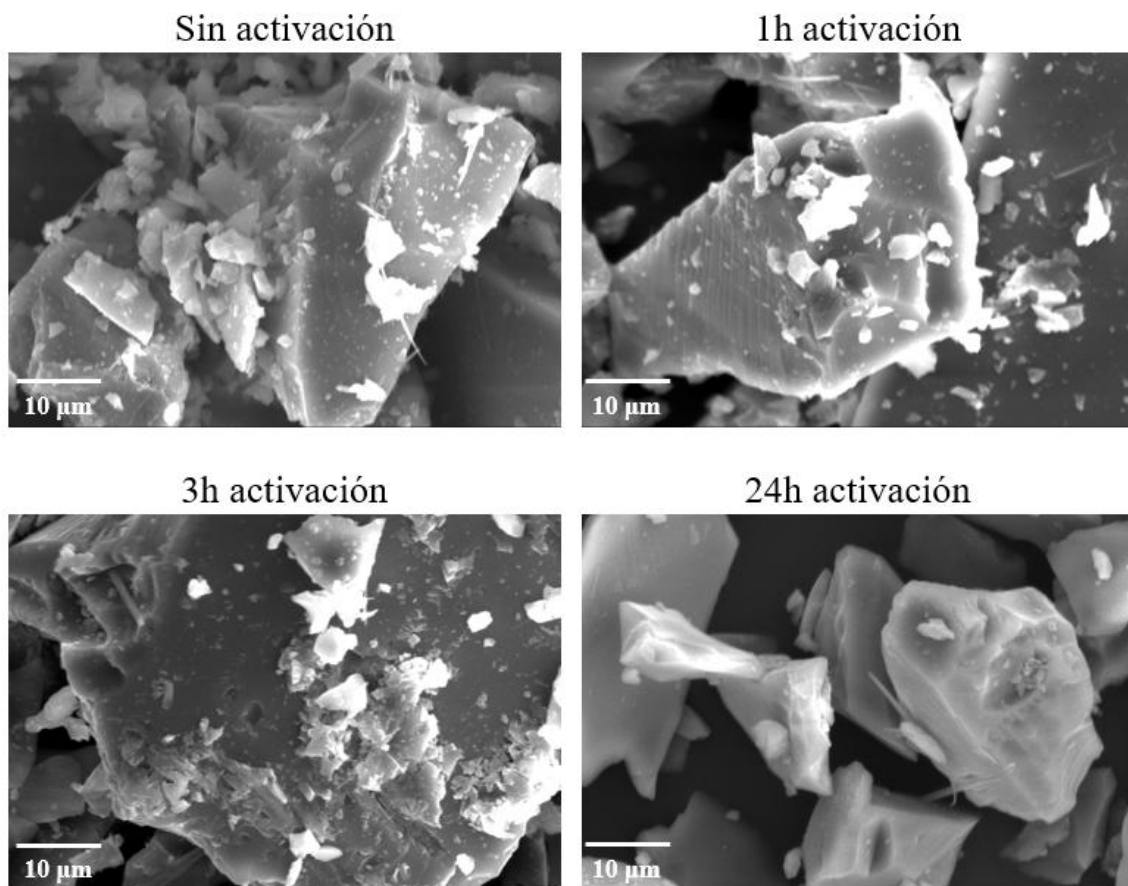


**Figura 15.** Análisis DTP posterior a la activación mecánica del vidrio.

El tamaño de partícula del material de la muestra sin activación mecánica (línea de color negro) tiene un tamaño de partículas grandes, con un intervalo de entre 2 a 600  $\mu\text{m}$ . Al compararlo con las muestras con activación se observó una tendencia más estrecha de las partículas, se obtuvo una reducción en la contribución de las partículas de mayor tamaño, acompañada de un incremento en las partículas de menor tamaño. La activación mecánica generó impactos entre las partículas del vidrio que incrementan la interacción superficial entre ellas [69], lo cual se reflejó en el análisis DTP al tener una tendencia de aglomeración de las partículas.

Durante la activación mecánica en agua, el vidrio inicial es disuelto parcialmente (disolución de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) 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 disminuyó a 41  $\mu\text{m}$ , indicando una ruptura entre las partículas; sin embargo, al prolongar la activación mecánica en 4 y 24 horas el tamaño volvió a incrementar hasta 71  $\mu\text{m}$ , evidenciando la aglomeración de las partículas. Esto confirmó la necesidad de limitar tiempos de activación para evitar la pérdida de superficie reactiva.

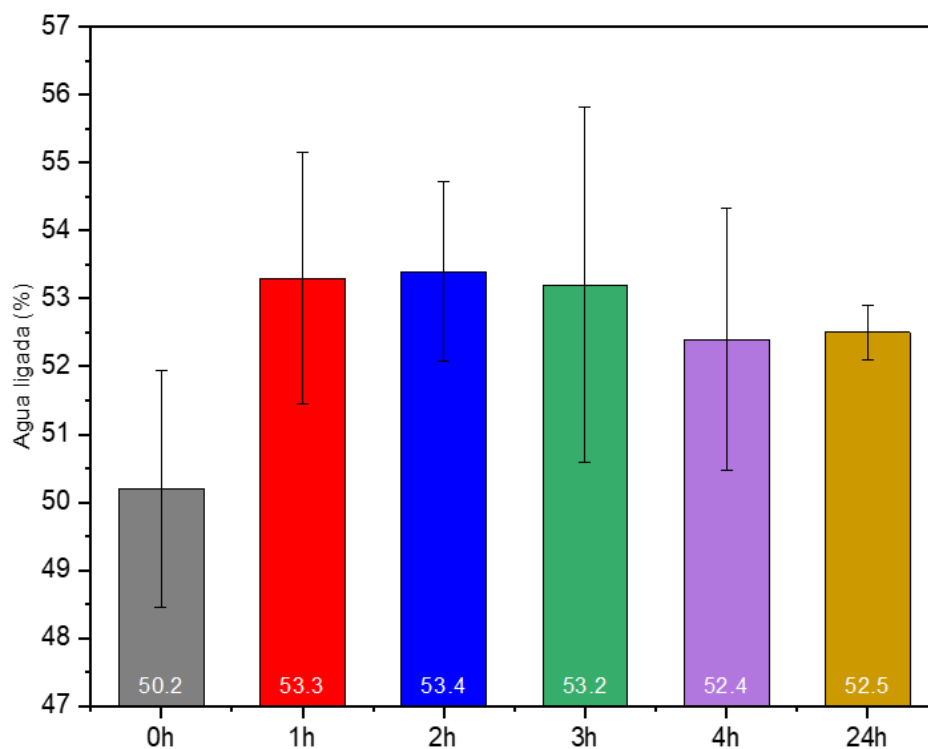
A partir de los resultados obtenidos en el análisis DTP, se llevó a cabo un estudio morfológico por SEM con el fin de evaluar posibles cambios provocados por el proceso de activación, cuyos resultados se presentan en la figura 16.



**Figura 16.** Micrografías del vidrio con activación mecánica.

En la figura 16 no se observan cambios significativos en la morfología de las partículas, lo que indica que, a pesar de la tendencia a la aglomeración sugerida en el DTP, las partículas mantienen su morfología después del proceso de activación.

Asimismo, se realizó un análisis mediante la prueba  $R^3$  para determinar la reactividad del vidrio, en este caso, utilizando el método B según la normativa ASTM C1897 [70] donde se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 17.



**Figura 17.** Análisis de la activación mecánica del agua de vidrio en horas: R<sup>3</sup>.

En la figura 17 se evidenció que el vidrio presentó una reactividad puzolánica; a mayor agua ligada, mayor formación de productos de hidratación y, en consecuencia, mayor reactividad del material [71]. Las muestras de 1 h y 2 h exhibieron una reactividad temprana, mientras que, a partir de la muestra de 3 h la reactividad bajó. Por lo tanto, la activación mecánica al vidrio generó una reactividad inicial acelerada, seguida de una rápida disminución; estos resultados sugieren que extender la activación mecánica hasta 4 h no genera un aumento significativo de reactividad con respecto a 3 h, aunque ambas condiciones presentan un desempeño superior al del vidrio sin activación.

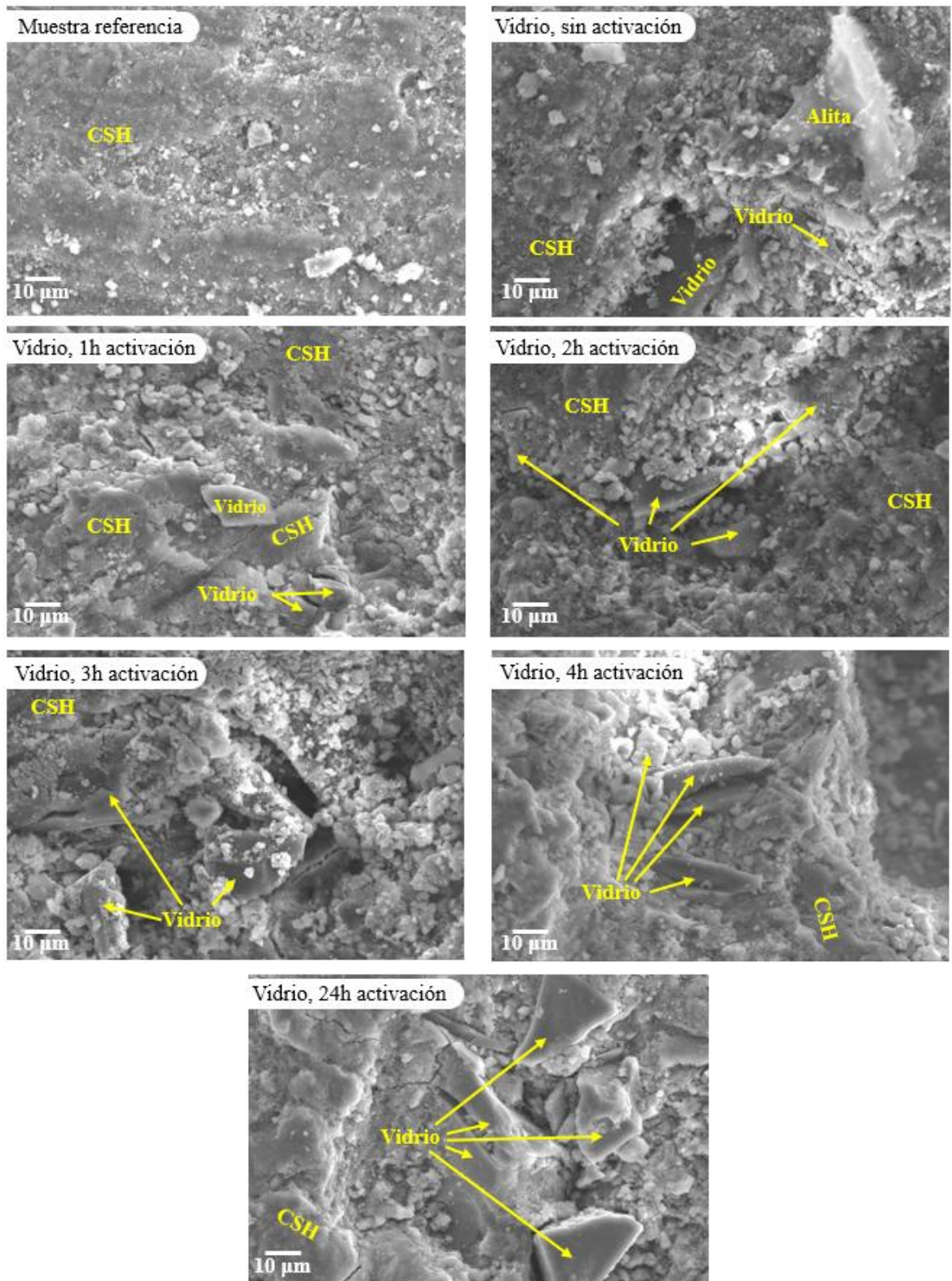
#### **4.3. Etapa 3. Efecto del tiempo de agitación en propiedades mecánicas.**

La etapa 3 constituye una continuidad de la etapa 2, la cual se enfocó en el análisis integral de los morteros, incluye la caracterización microestructural mediante SEM, el estudio del comportamiento calorimétrico y la evaluación de su desempeño mecánico mediante las pruebas de resistencia a la compresión y la flexión, esto en función de las diferentes horas de activación mecánica realizadas.

En la figura 18 se presentan las micrografías SEM correspondientes a los morteros de cemento y los 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 [72].

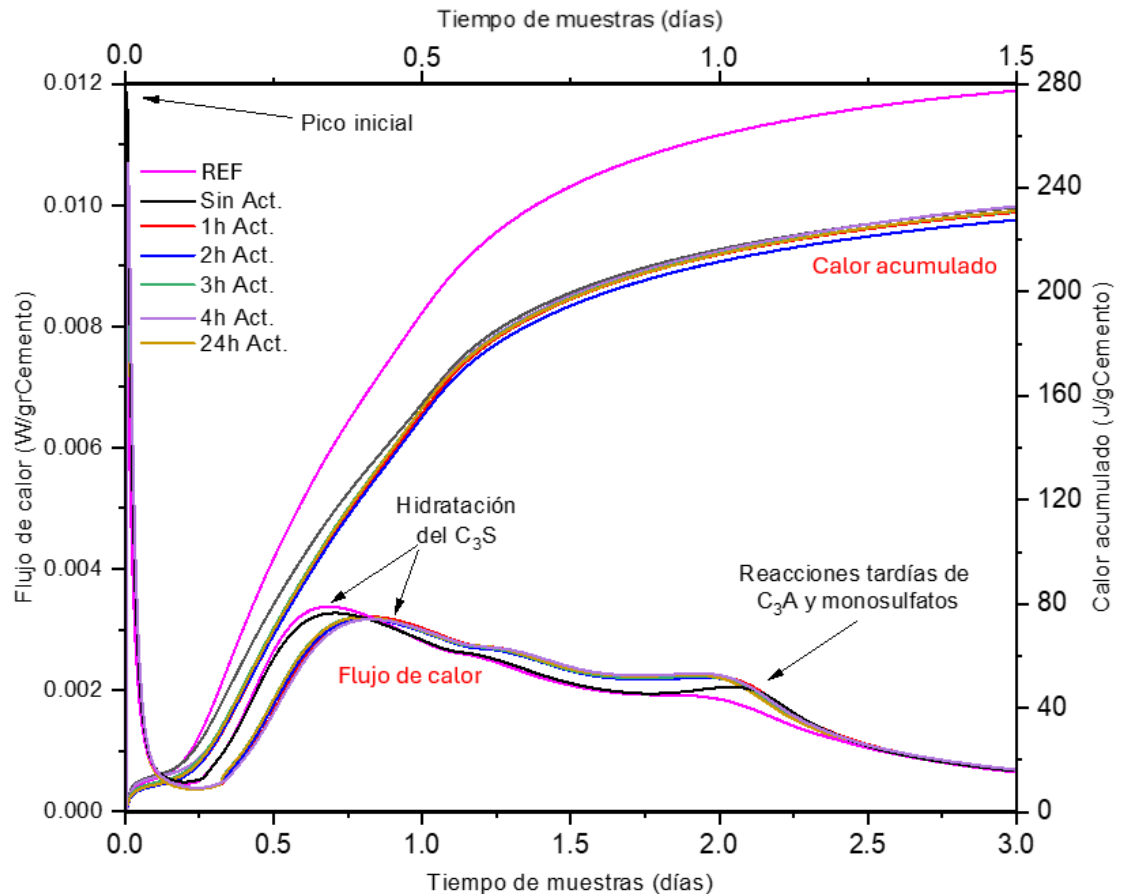
En contraste, la muestra con vidrio agregado, sin activación, presenta algunas partículas de vidrio las cuales no están reaccionando, de igual manera se observa una fase de alita y productos CSH lo cual indica que, en ausencia de activación mecánica, el vidrio presentó una participación limitada en las reacciones de hidratación. Con el avance del tiempo de activación mecánica se observó 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 permitió comprobar que, tras un tiempo suficiente de activación mecánica, el vidrio participa en la formación de fases cementantes, reforzando la hipótesis de su potencial como material suplementario en la matriz.



**Figura 18.** Micrografías de morteros, muestras con activación mecánica.

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 19.



**Figura 19.** Calorimetría de pastas con vidrio con activación mecánica a diferentes tiempos; Flujo de calor y Calor acumulado.

**NOTA.** – El flujo de calor (W/grCemento) se representa en el eje vertical izquierdo en función del tiempo indicado en el eje horizontal superior. Por su parte, el calor acumulado (J/gCemento) se muestra en el eje vertical derecho, en función del tiempo señalado en el eje horizontal inferior.

En la figura 19, 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 flujo de

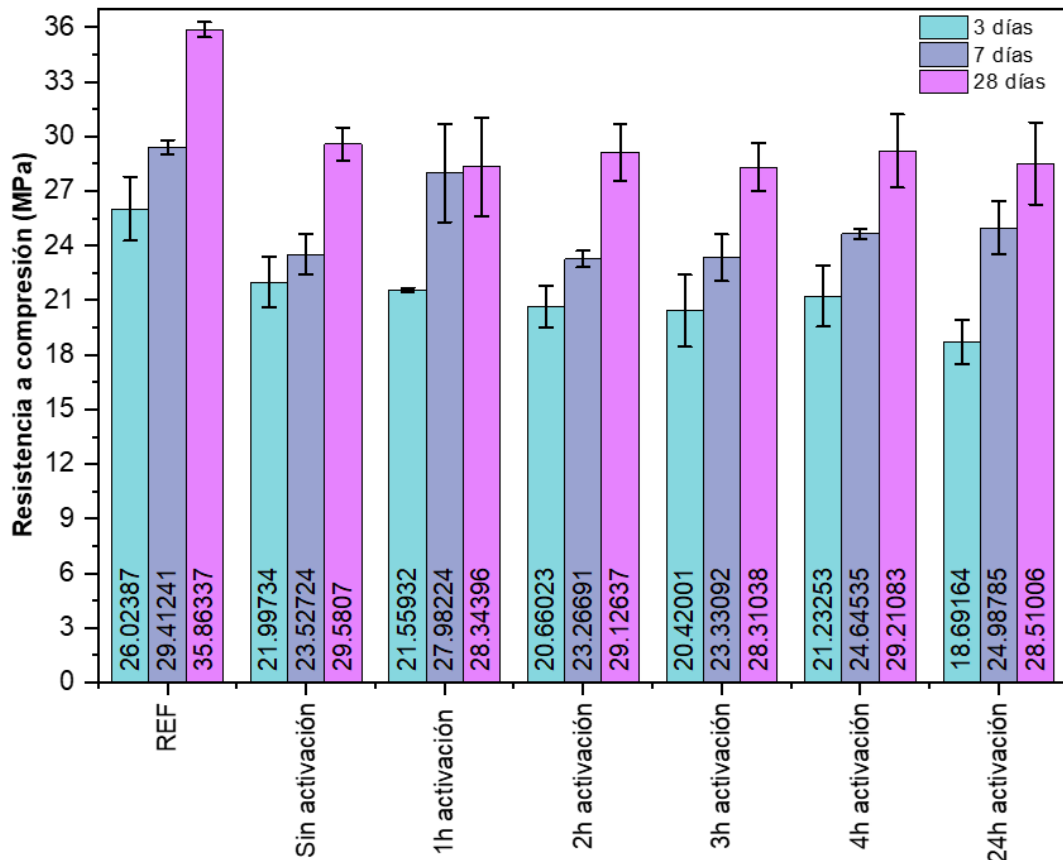
calor rastrea la velocidad de la reacción del material [73]. Las curvas muestran el comportamiento típico de hidratación del cemento; en las mezclas con vidrio se observó una disminución en la intensidad del pico máximo con respecto a la muestra REF. Sin embargo, la incorporación del vidrio y la activación mecánica no presenta cambios significativos con respecto al tiempo de reacción, por lo que no se ve modificada la cinética inicial de hidratación.

El calor acumulado, por otro lado, expone que el efecto de la activación al vidrio afecta la reacción de hidratación y se pudo observar la disminución de la liberación de calor con respecto a la muestra REF, al registrarse una ligera disminución cuando se sustituye el vidrio. La figura 19 reveló que los morteros con VSC adicionado muestran una menor intensidad de calor acumulado, aproximadamente 16%, en comparación con el mortero de REF. Esto es comparable con estudios previos, donde se obtienen disminuciones de calor acumulado similares, de entre 16 a 20% [74–76].

Según Zhang y colaboradores [77], aunque el VSC finamente molido se disuelva en un entorno de pH alto y tenga una reactividad puzolánica, su contribución a la hidratación temprana es limitada. El mortero con 4 h de activación mostró el mayor desarrollo de calor acumulado en los días finales del ensayo, mientras que el mortero con 2 h de activación mostró el menor desarrollo de calor.

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 [32,77].

Completando la caracterización de los morteros, se realizaron pruebas a compresión y flexión, según la normativa ASTM C109. En la figura 20 se muestran los resultados obtenidos de la compresión de las muestras.



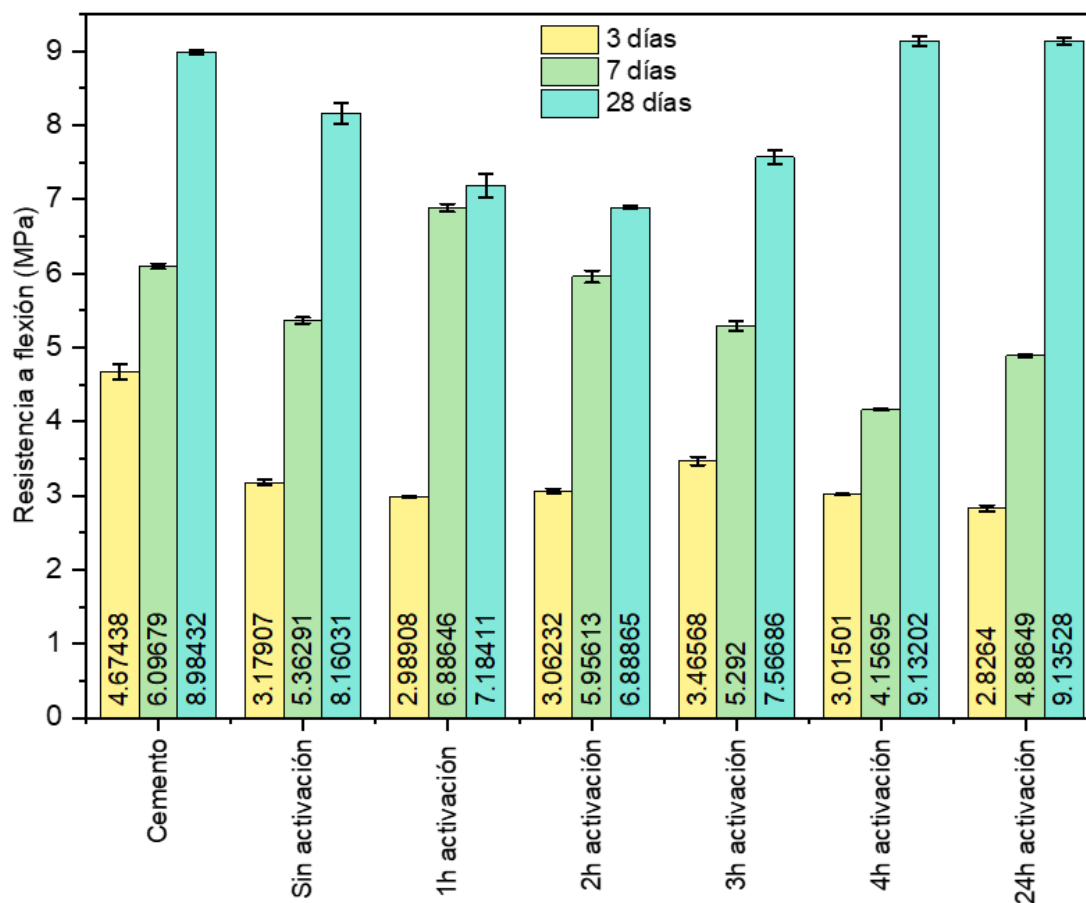
**Figura 20.** Resistencia a compresión de morteros con diferentes tiempos de activación.

La figura 20 presenta los valores de resistencia a compresión a 3, 7 y 28 días de curado. La muestra REF presenta el mayor desempeño mecánico a 28 días, obteniendo 36 MPa. En el caso de los morteros con vidrio, se observó que se tiene una tendencia a la recuperación de resistencia a 7 y 28 días, especialmente en los sistemas con activación mecánica [76].

A 28 días, todas las mezclas con vidrio alcanzan valores cercanos a 28 y 29 MPa, mientras que la muestra REF se sitúa alrededor de 36 MPa, lo que indica una disminución del 22% de resistencia a compresión, comportamiento comparable con lo reportado por Nahi et al. y Dobiszewska et al., quienes observaron reducciones similares al incorporar vidrio como sustituto parcial del cemento. [68,76]. Dentro de los sistemas activados, las mezclas con 2, 3 y 4 h presentaron valores muy similares; aunque la muestra con 4 h de activación tenga uno de los valores más altos dentro del grupo de morteros con vidrio (29.2 MPa), la tendencia general indica que entre 2 y 4 h de activación el comportamiento mecánico se estabiliza.

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 24 h de activación no genera un beneficio adicional significativo, ya que se obtiene una resistencia de 28.52 MPa, siendo un valor comparable al de 2 h y 3 h.

Por otro lado, en la figura 21 se exhiben los resultados obtenidos de la flexión de las muestras.



**Figura 21.** Resistencia a flexión de morteros con diferentes tiempos de activación.

Esta figura expone la evolución de la resistencia a la flexión de los morteros elaborados. La muestra REF 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 4 h y 24 h 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 [76].

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

investigaciones con respecto a esto demuestran que la resistencia varía dependiendo del tipo, tamaño y la fuente de vidrio utilizada [78]. El vidrio, por su sílice amorfa, reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  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.

Aun así, se logró observar como la prueba a flexión el efecto de la activación mecánica del vidrio es más evidente. Este comportamiento indica que se está favoreciendo una mejor interacción entre el VSC y la matriz cementante, en particular en edades tardías. Esta mejora se atribuye a la finura del VSC, lo que le permite llenar poros y promover una microestructura más densa [79,80].

Considerando los resultados obtenidos se observa que el tiempo de activación mecánica óptimo es el de 3 h, debido a la reducción del tamaño medio de partícula ( $D_{50} = 40.88 \mu\text{m}$ ) lo que favorece una mayor superficie específica disponible para reaccionar. Este comportamiento permite una mejor incorporación del vidrio en la matriz cementante al promover la reactividad puzolánica del material [28].

Desde el punto de vista de la reactividad, los resultados del método  $R^3$  mostraron un incremento ligero en el contenido de agua ligada (53.2%) respecto al vidrio sin activación (50.2%), lo que indica una mayor formación de productos hidratados [32]. No obstante, entre las muestras con activación mecánica no se observaron diferencias significativas en el porcentaje de agua ligada. Este comportamiento es coherente con los resultados de calorimetría (231 J/g de calor acumulado), donde la activación de 3 h evidenció una respuesta reactiva. Aunque la adición de VSC induce un retraso en la liberación de calor en edades tempranas debido a su menor participación inicial [81].

De igual manera, con 3 h de activación, se mantiene una coherencia con las propiedades mecánicas, alcanzando resistencias a compresión de 28.31 MPa y resistencias a flexión de 7.56 MPa a 28 días, los cuales tenían valores comparables a los obtenidos con otros tiempos de activación mecánica.

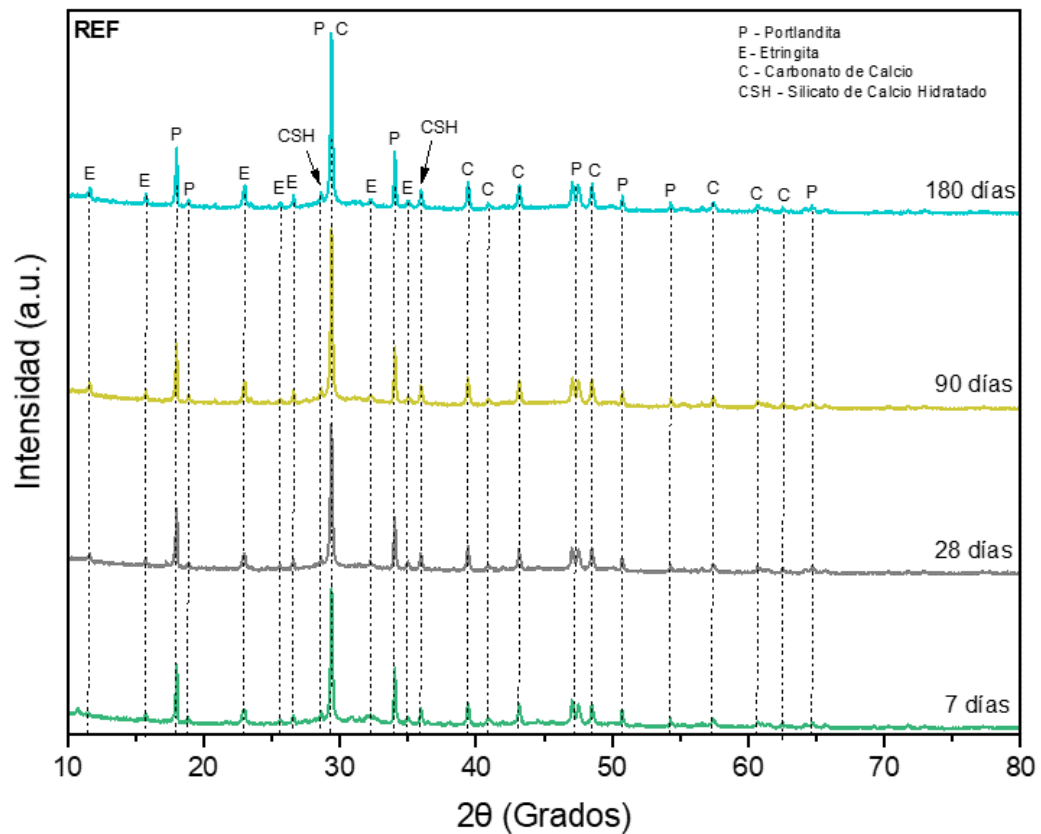
En función de los resultados obtenidos, la activación mecánica de 3 h representa una condición óptima al equilibrar la mejora en la reactividad del sistema, el desarrollo de las propiedades mecánicas y la optimización del tiempo de tratamiento.

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

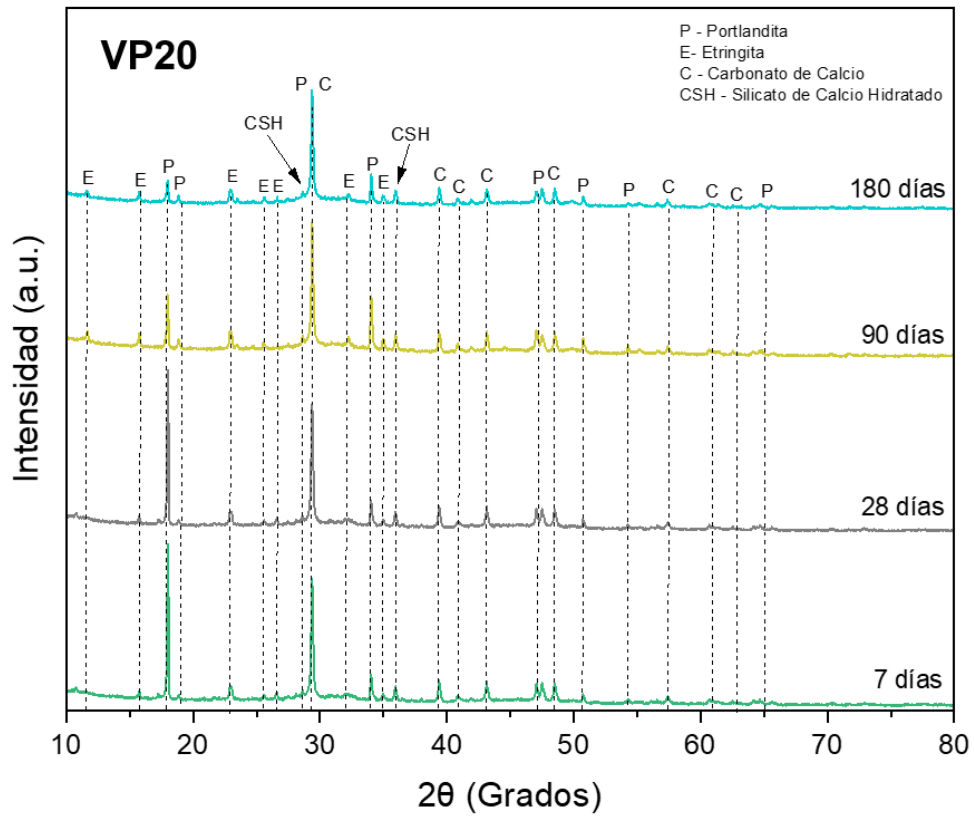
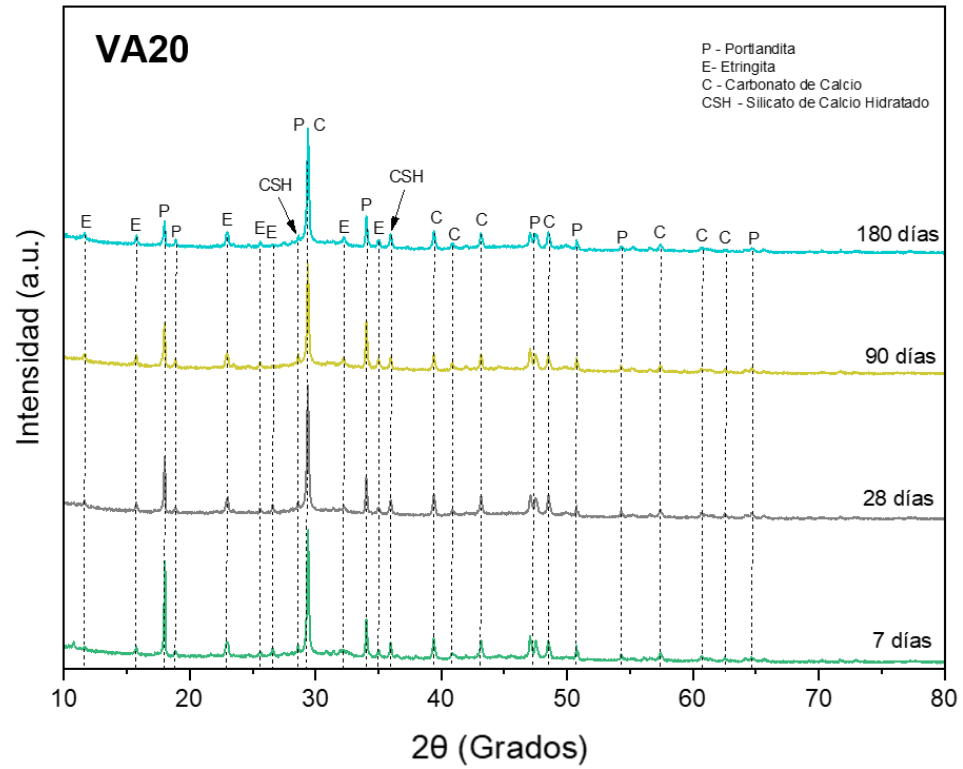
Considerando la selección de 3 h de activación mecánica como el tiempo óptimo de tratamiento al vidrio, se procedió a trabajar con las sustituciones de CP por vidrio en porcentajes mayores (30, 40 y 50%). De igual forma, a partir de esta fase se comenzó la realización de curados prolongados, de 90 y 180 días.

De acuerdo con Tognonvi y colaboradores [82] 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 participación del vidrio en las reacciones de hidratación es limitada, por lo que el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  es bajo y predomina el efecto de disolución del cemento [83]. Sin embargo, conforme avanza el proceso de curado (en este caso, de 90 y 180 días), el vidrio comienza a disolverse progresivamente en el medio, liberando Sílice que reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  lo cual genera la formación adicional de geles CSH.

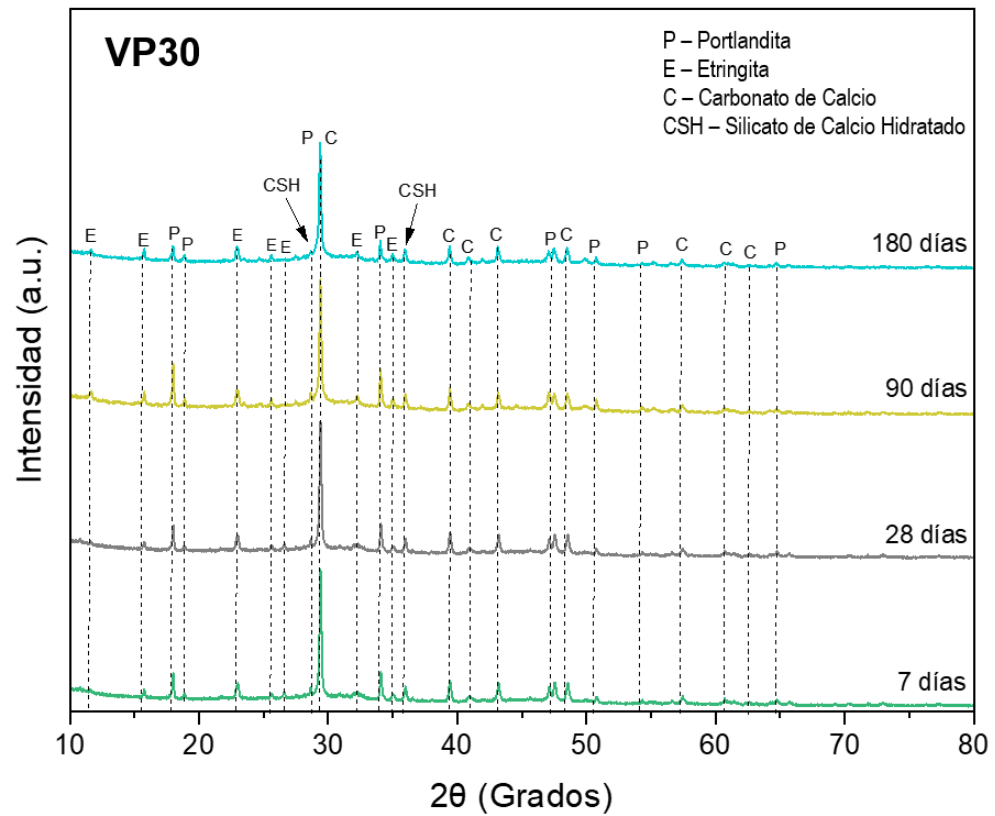
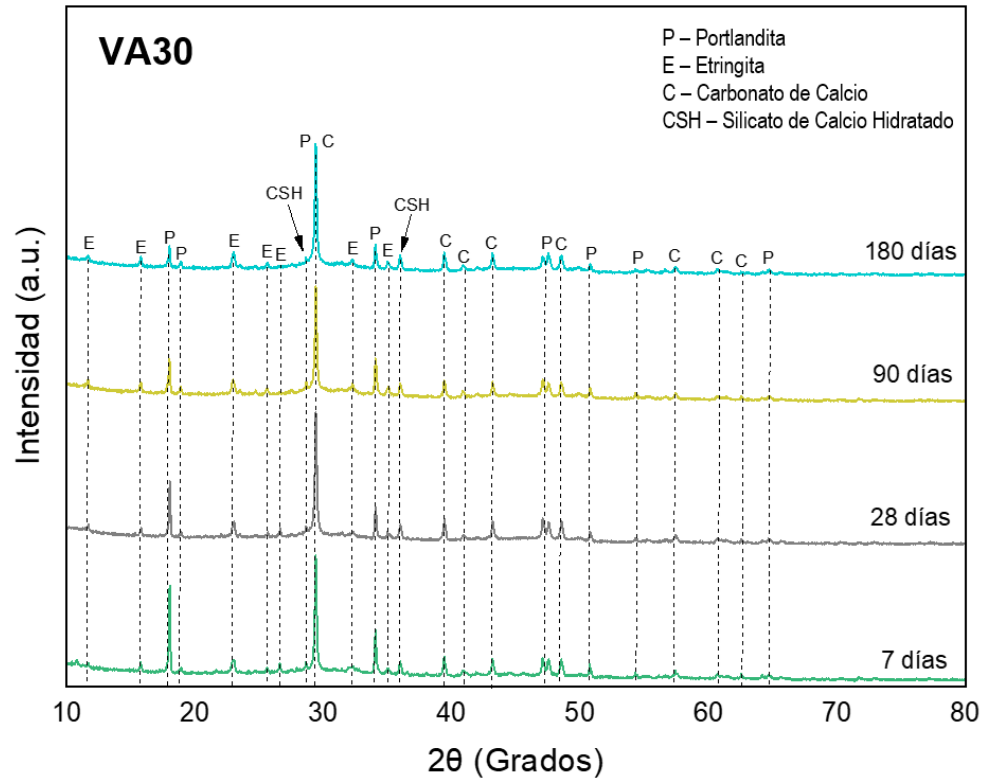
Por esta razón, en conjunto con el análisis de propiedades mecánicas a estas edades, también se realizaron análisis XRD y FTIR de las diferentes muestras, considerando las muestras REF y las de 20% de sustitución para la comparación de resultados. En las figuras 22, 23, 24, 25 y 26 se muestran los resultados obtenidos de XRD para cada una de las muestras a 7, 28, 90 y 180 días de curado.



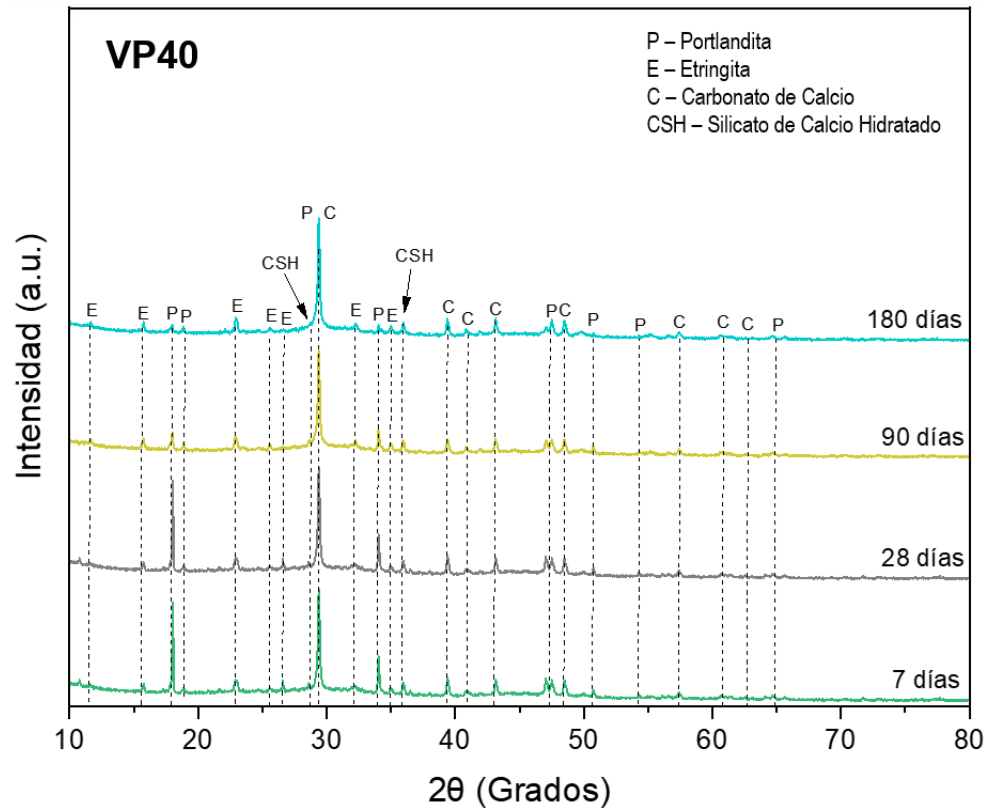
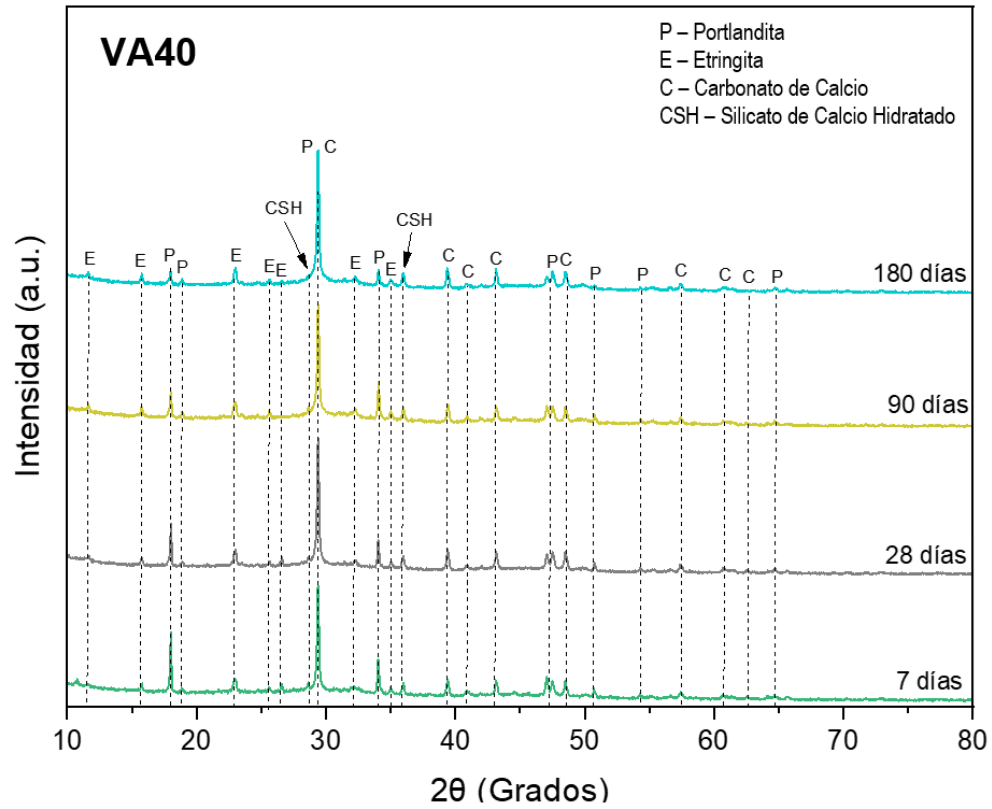
**Figura 22.** XRD de pastas de muestra REF a 7, 28, 90 y 180 días de curado.



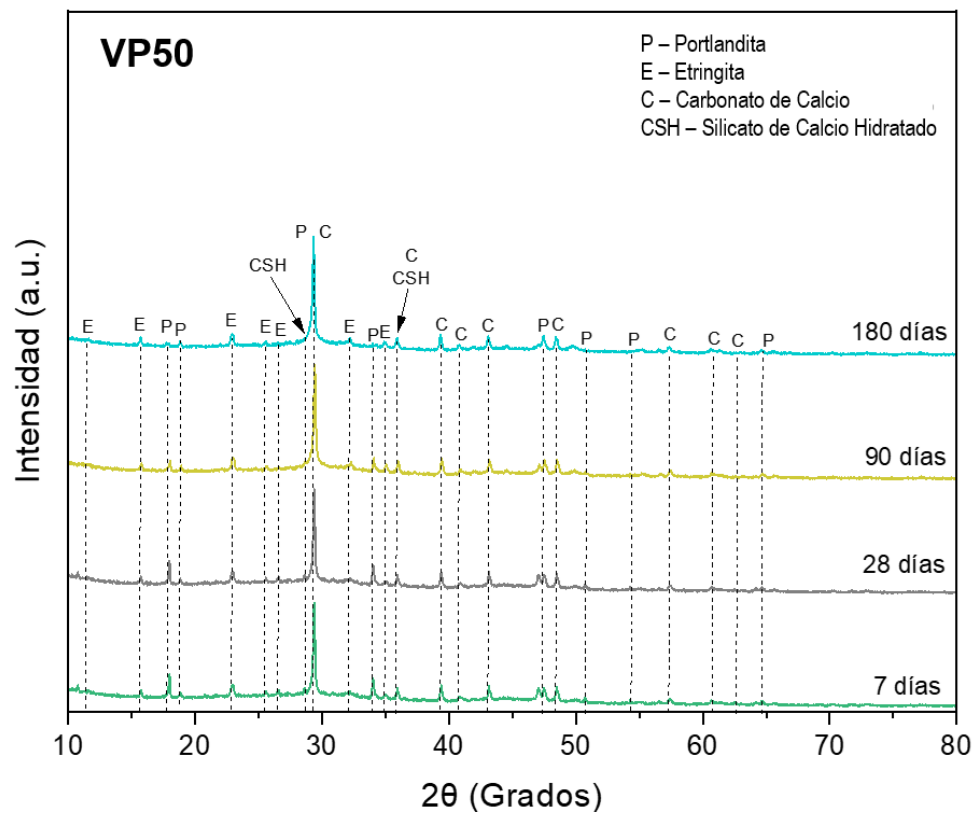
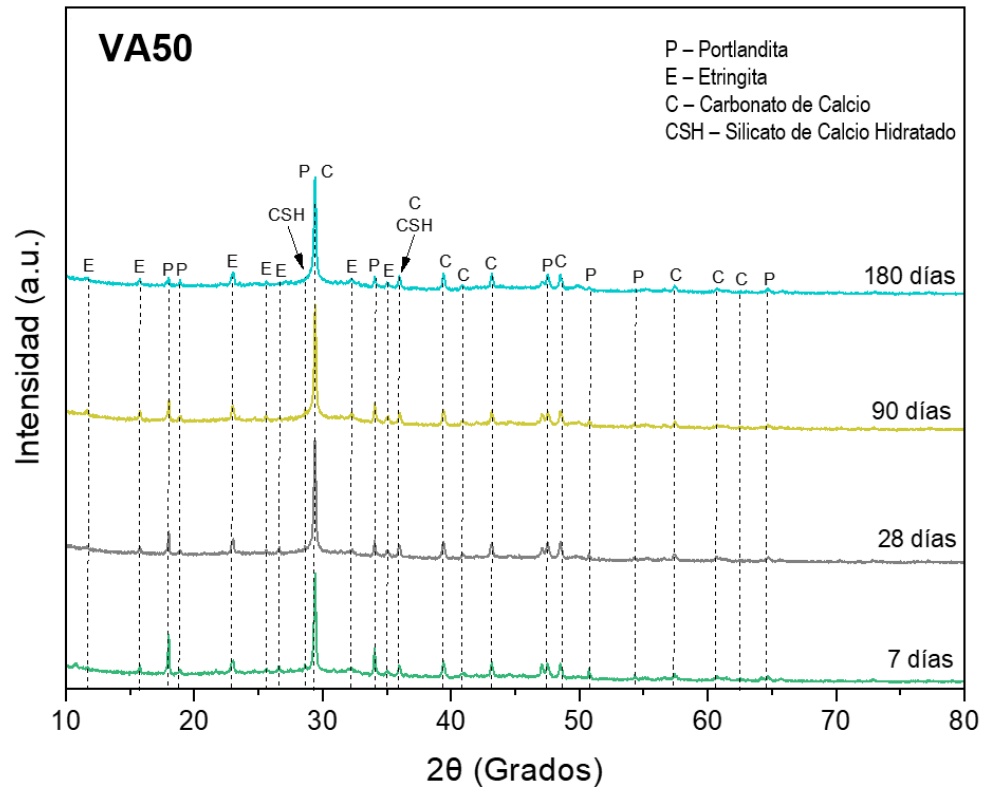
**Figura 23.** XRD de pastas con 20% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado.



**Figura 24.** XRD de pastas con 30% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado.



**Figura 25.** XRD de pastas con 40% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado.

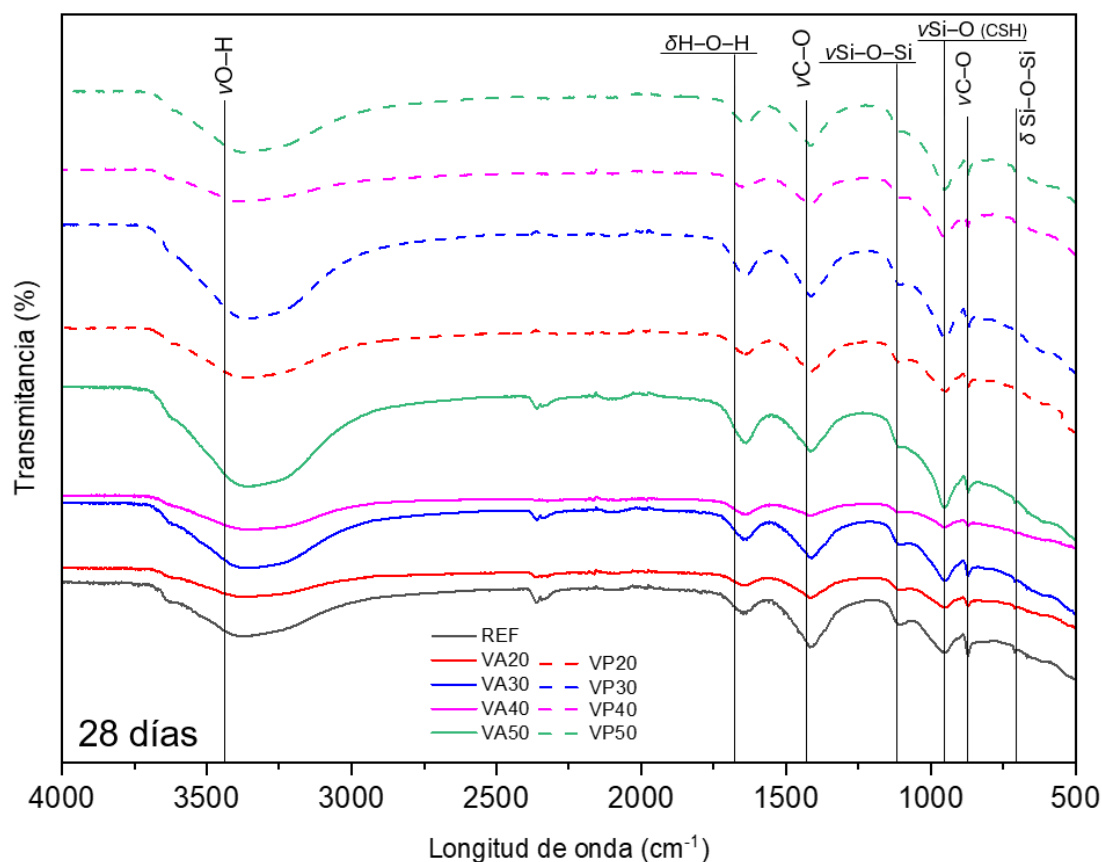


**Figura 26.** XRD de pastas con 50% de sustitución a 7, 28, 90 y 180 días de curado.

Los difractogramas de las diferentes muestras presentan los picos de difracción característicos de morteros: la etringita, la 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 favoreció el consumo progresivo de  $\text{Ca(OH)}_2$  a edades de curado tardías, mediante su reacción con la Sílice liberada debido al medio alcalino. Este comportamiento, es asociado a la intensidad del pico que corresponde a la portlandita en los patrones de XRD, lo que evidenció la formación adicional de geles CSH y confirmó que el vidrio tiene una reactividad puzolánica lenta [82–84].

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 27 y 28.



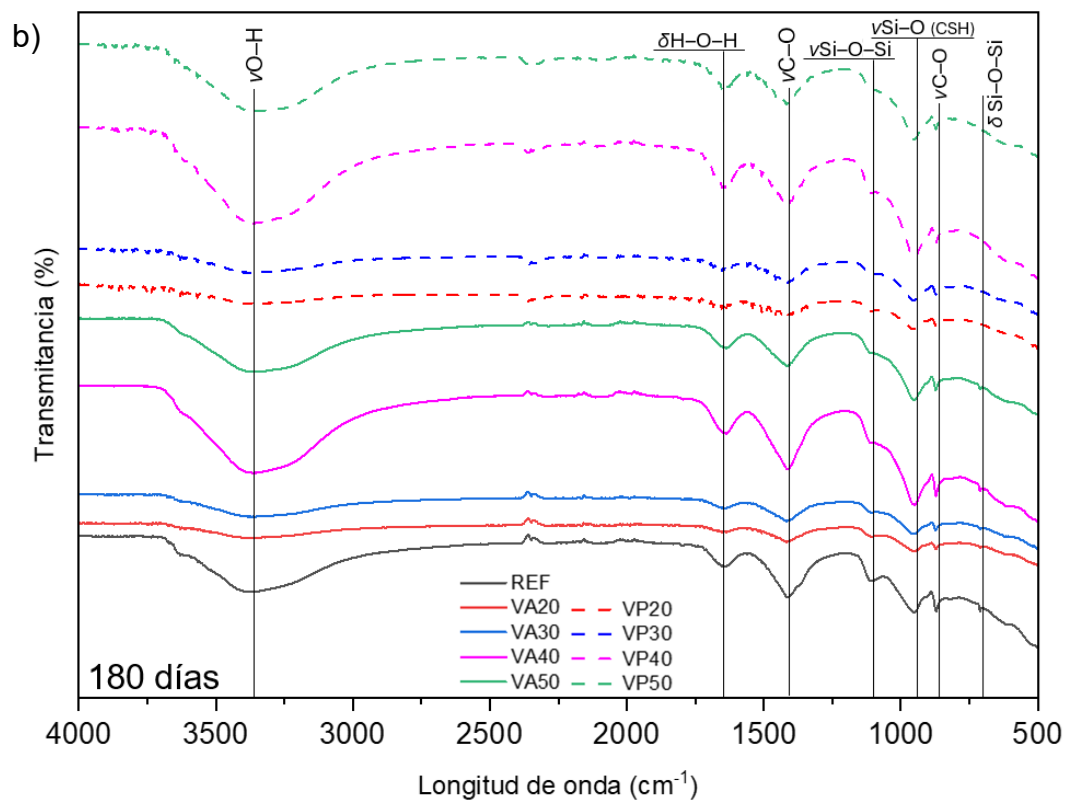
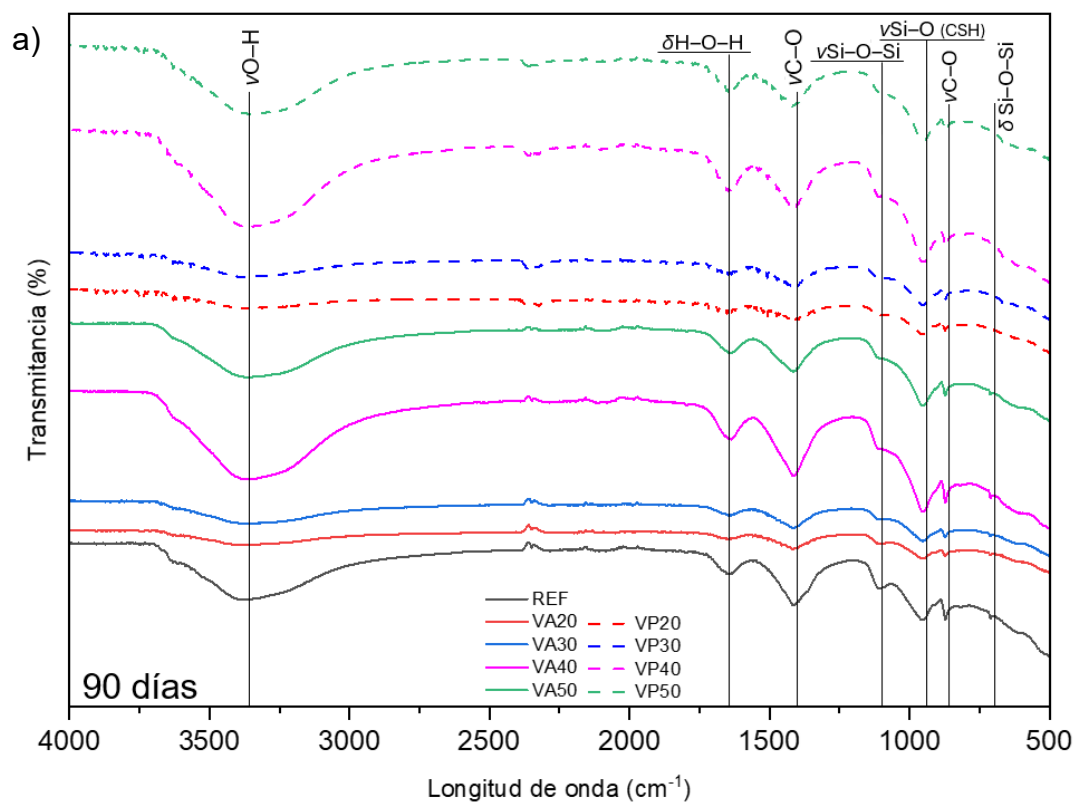
**Figura 27.** FTIR de las pastas con vidrio sin activación mecánica (VA) y vidrio con activación mecánica (VP) a 28 días de curado.

De acuerdo con los resultados mostrados en las figuras 27 y 28, se pueden observar ligeros cambios en las bandas de los grupos funcionales de cada muestra. Las muestras con vidrio sin activación mecánica (VA) presentan una disminución de señal, con respecto a la muestra REF, en las bandas asociadas al OH<sup>-</sup>, lo que se puede interpretar como una menor absorción de agua o un avance de la hidratación según Li y Sakai [85]. De manera similar, las muestras con vidrio con activación mecánica (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<sup>-1</sup>, correspondiente al CSH. Este comportamiento

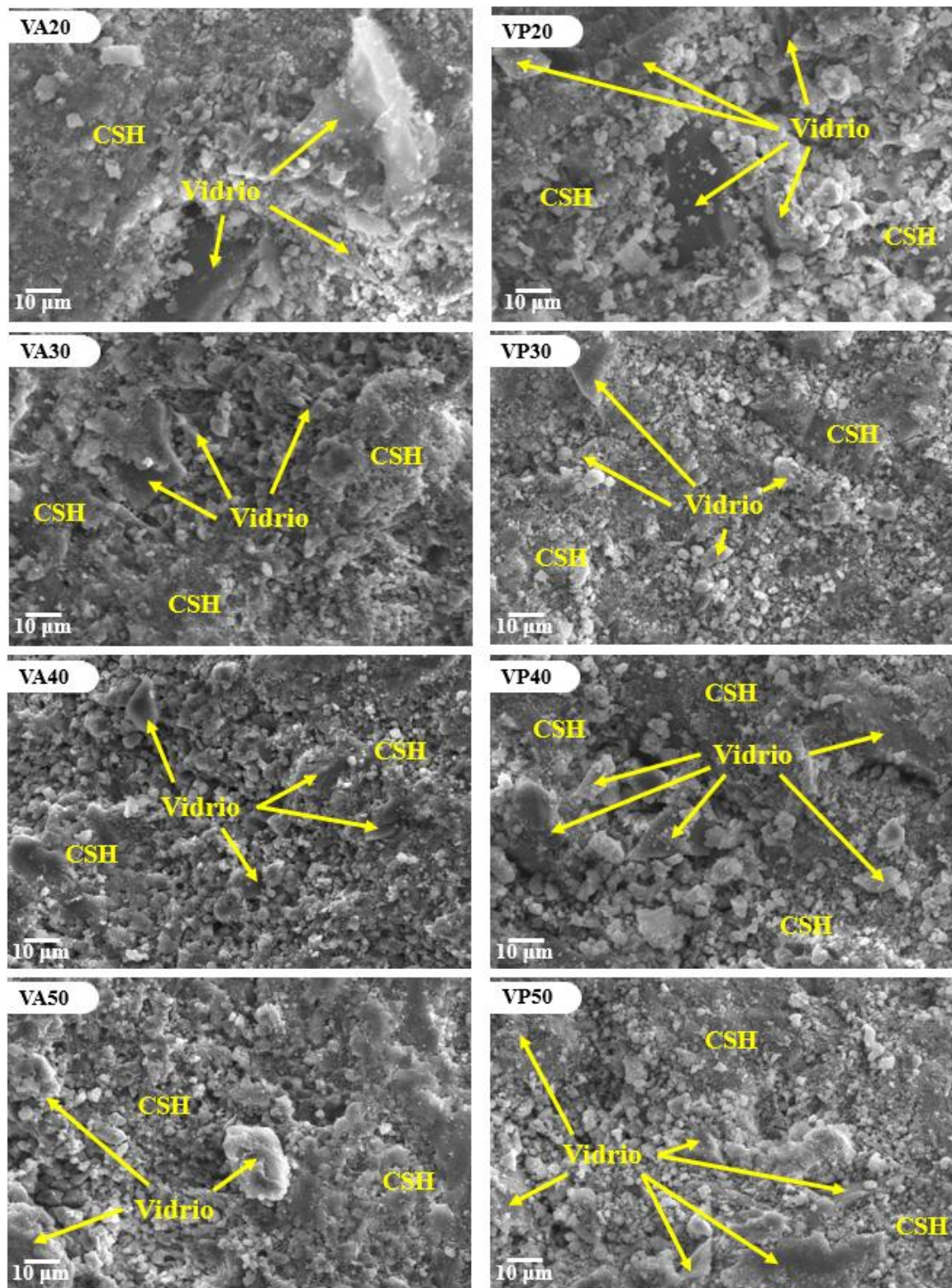
concuerta con la tendencia descrita en la literaria para pastas con composiciones similares [32,67,84].

En ambas muestras, VA y VP, se identifica la presencia de  $\text{SiO}_2$ , sin embargo, las VA presentan una banda más ancha asociada con este grupo funcional, mientras que en las VP tienden a disminuir. Esto puede atribuirse a que el  $\text{SiO}_2$  está reaccionando y participando en la formación de un mayor contenido de CSH para las edades mayores [32].

En la figura 29, 30 y 31 se presentan las micrografías SEM correspondientes a los morteros con diferentes porcentajes de sustitución de vidrio y tres tiempos de curado; mientras la figura 32 muestra el EDS de las muestras de 20 y 30% con sustitución.



**Figura 28.** FTIR de las pastas con vidrio sin activación mecánica (VA) y vidrio con activación mecánica (VP) a a) 90 días de curado y b) 180 días de curado.



**Figura 29.** Micrografías de morteros con sustitución de vidrio a 28 días.

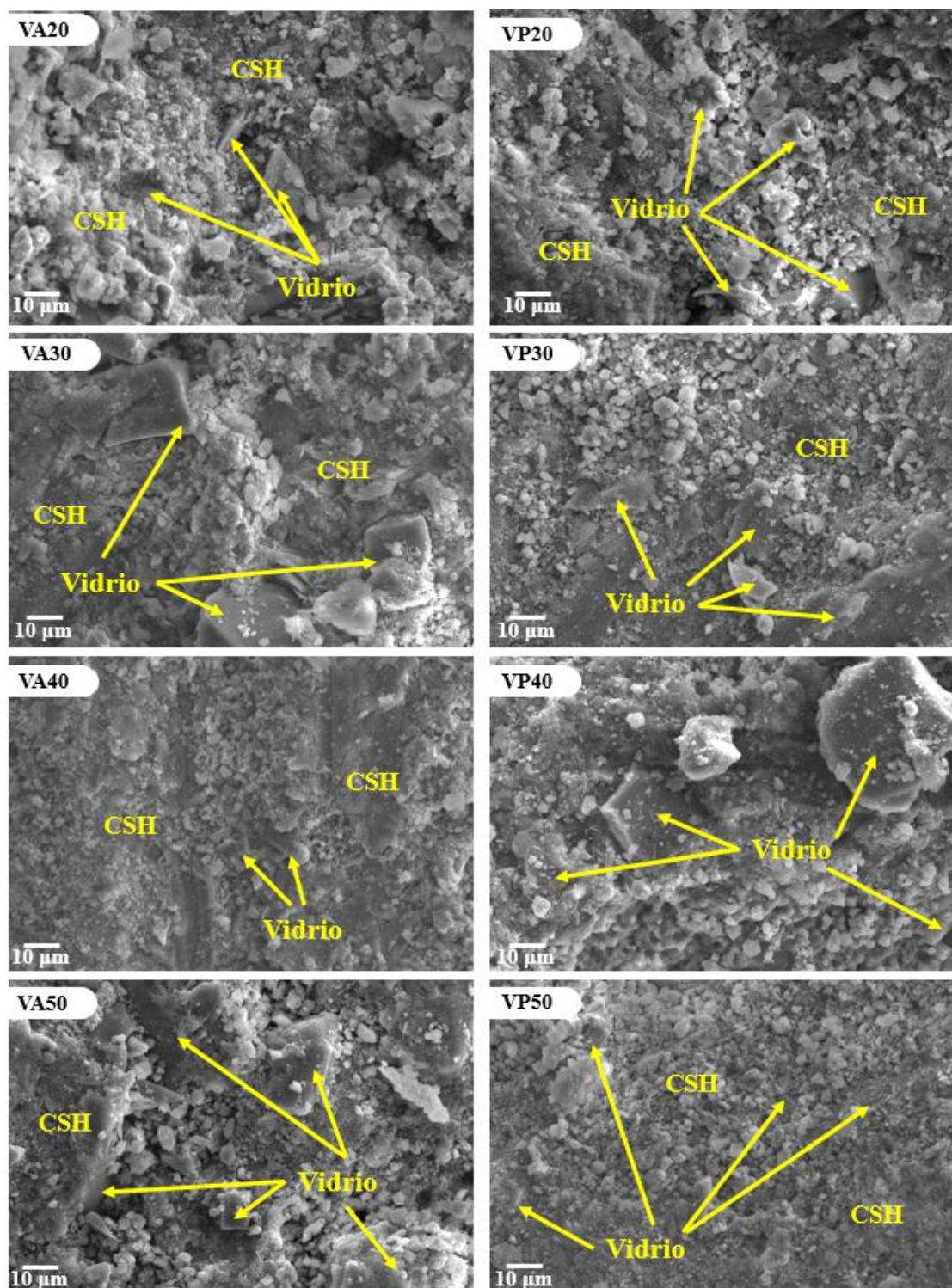
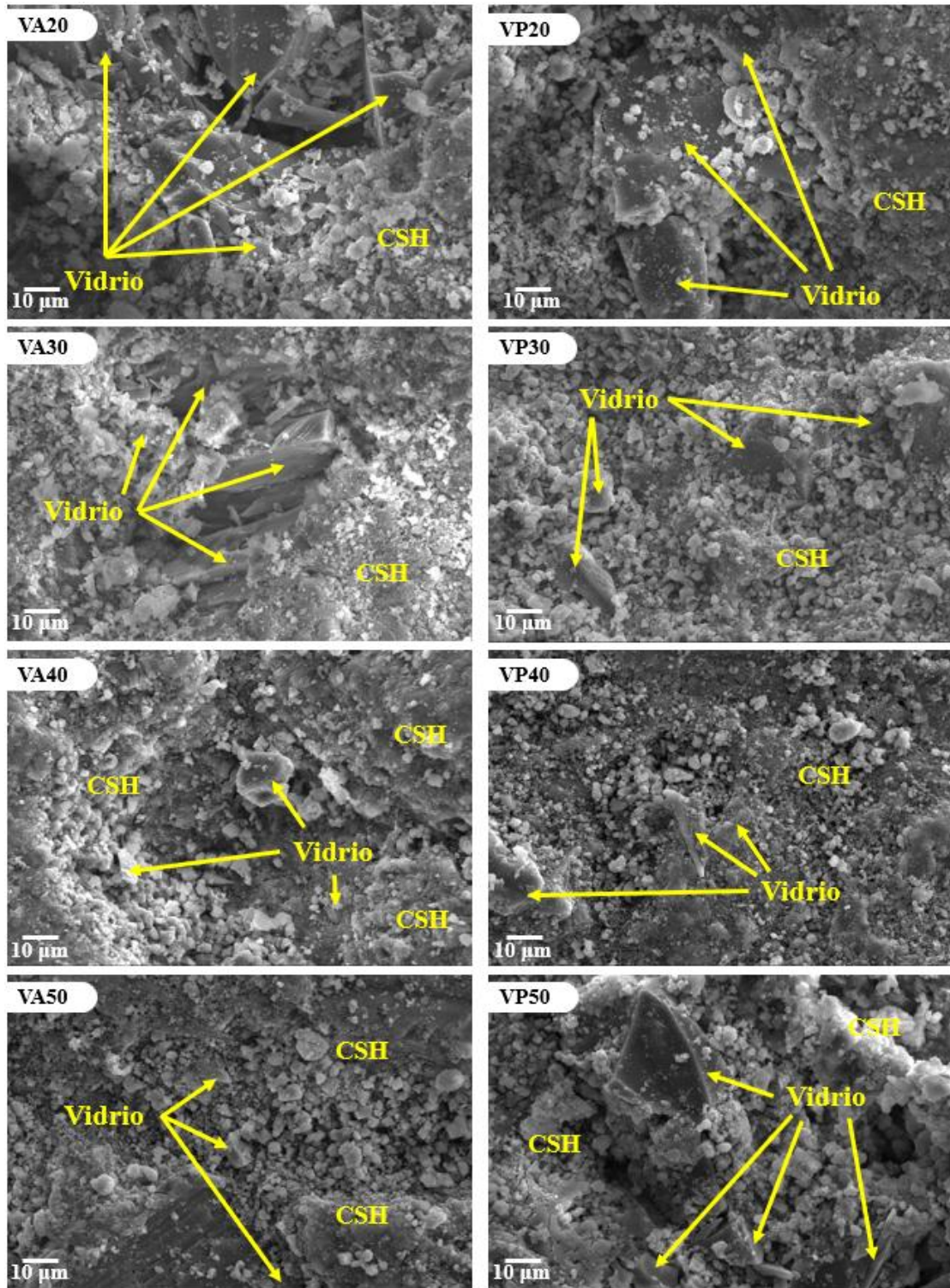
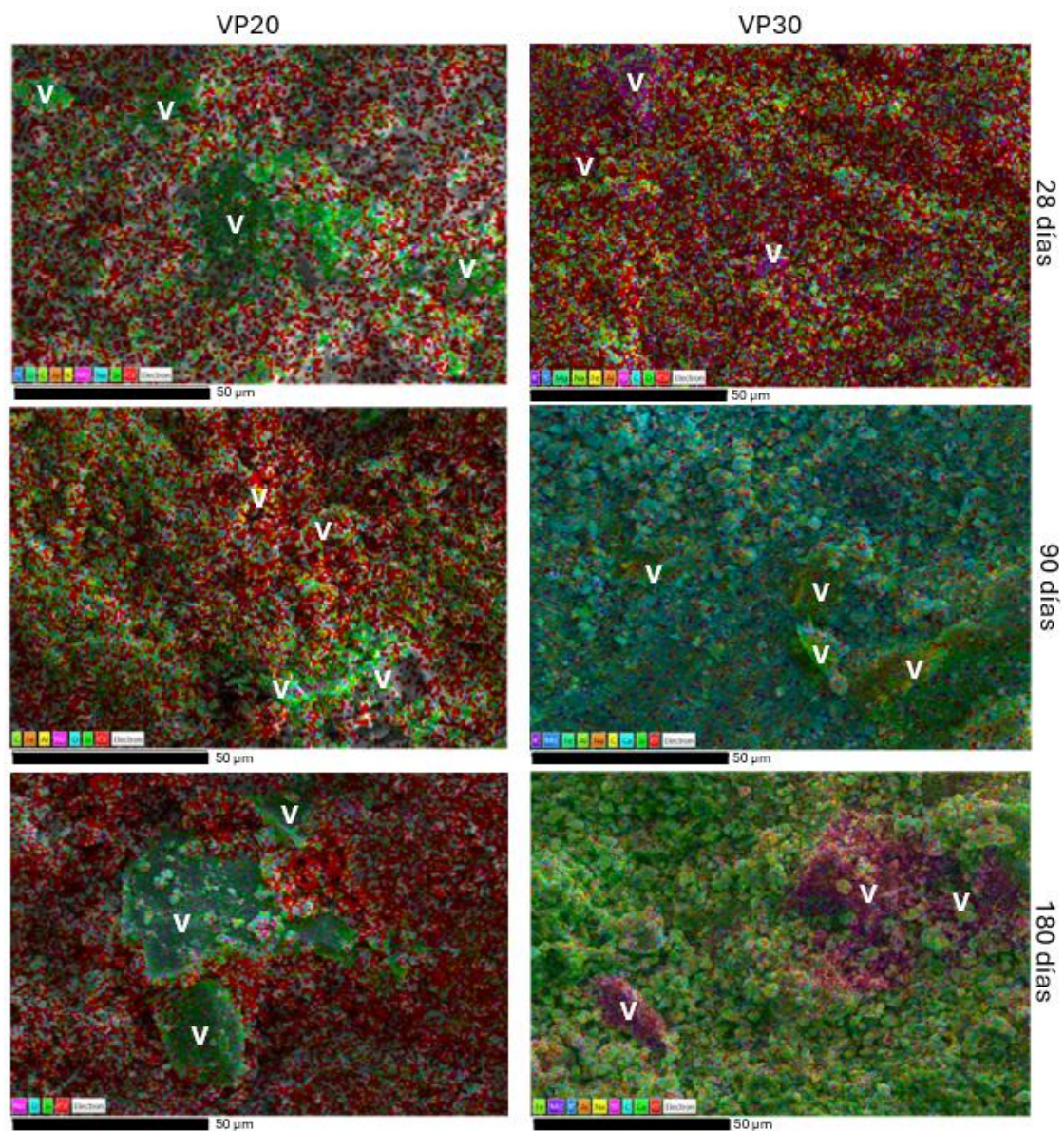


Figura 30. Micrografías de morteros con sustitución de vidrio a 90 días.



**Figura 31.** Micrografías de morteros con sustitución de vidrio a 180 días.



**Figura 32.** Micrografías EDS de morteros VA y VP (20% y 30%) a diferentes tiempos de curado.

La microestructura reveló que las partículas de vidrio permanecen distinguibles en todas las muestras, siendo rodeadas por productos de hidratación, en este caso, geles CSH. Esta distribución sugiere una integración efectiva del vidrio con activación mecánica en la matriz cementante. Esto concuerda con lo mencionado por Dobiszewska y colaboradores [68] quienes determinaron que las partículas finas de vidrio actúan como

centros de cristalización y proporcionan un área adicional para la generación de nuevos geles CSH. Este comportamiento se comprobó mediante un mapeo elemental por EDS, donde las partículas de vidrio (marcadas en la figura 32 con la letra V) se observan rodeadas principalmente por Calcio, Silicio, Oxígeno e Hidrógeno, siendo esta la distribución elemental de los productos de hidratación, como geles CSH.

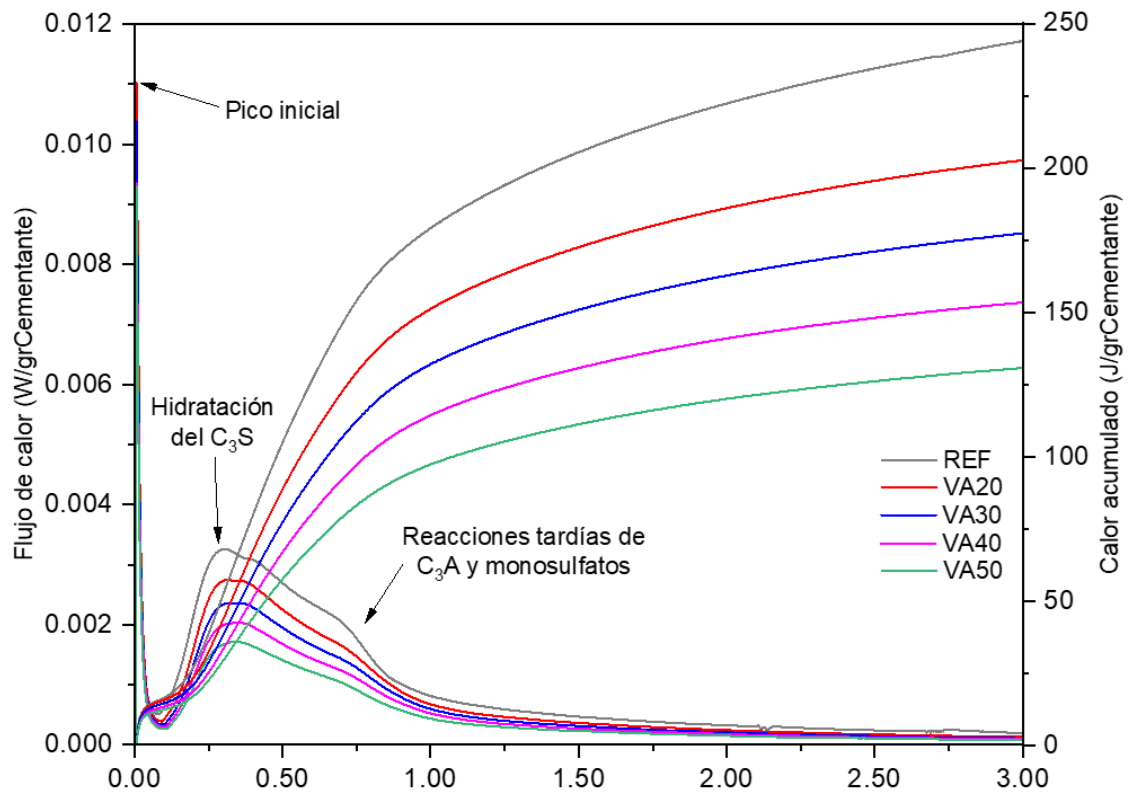
A los 28 días, la superficie de las partículas de vidrio presenta aún bordes bien definidos, lo que indica que todavía no ha iniciado la reacción entre los materiales. En esta etapa, la matriz cementante muestra la formación moderada de CSH en ciertas zonas.

A los 90 días, por otro lado, se evidenció 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.

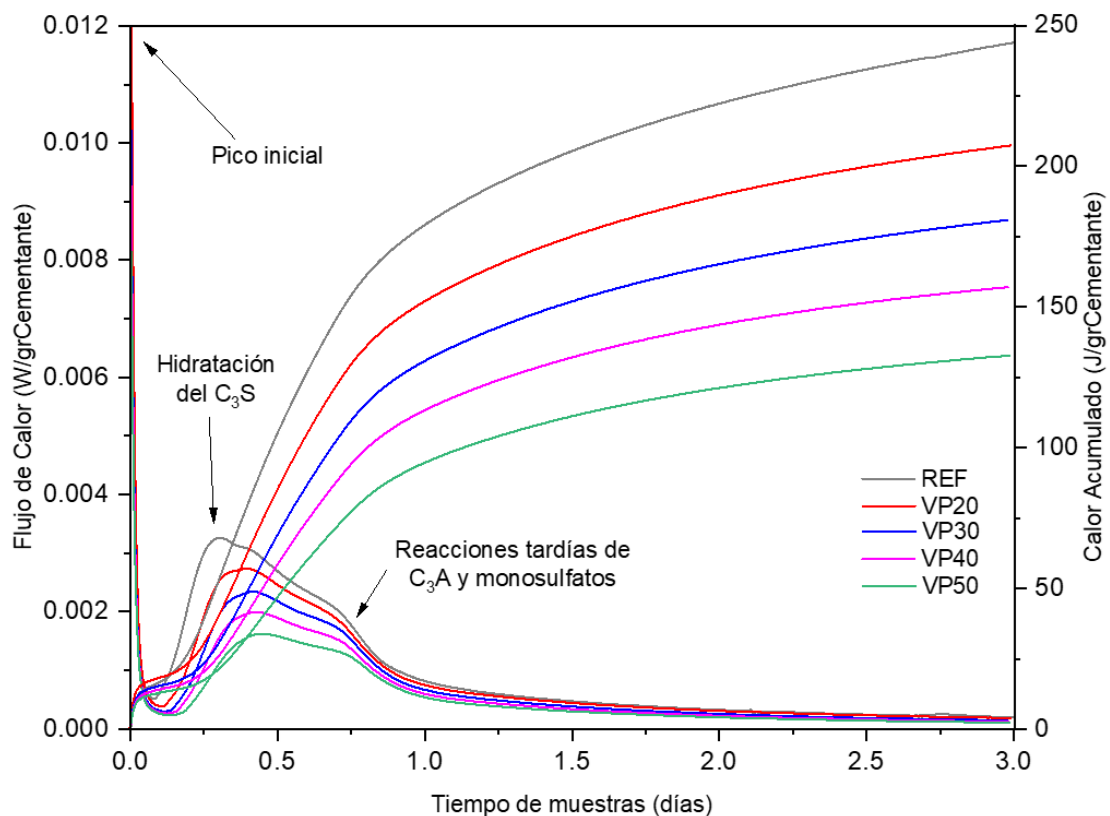
Finalmente, a los 180 días, la matriz cementante comenzó a ser más compacta en todas las muestras, con una mayor cobertura de los productos de hidratación sobre las partículas del vidrio. En las muestras VA, el vidrio tiende a estar casi cubierto por el gel, lo que indica una reacción más avanzada y una posible incorporación de la sílice en la formación de estos. Mientras que en las muestras VP, se apreció un comportamiento similar, sin embargo, se distingue una mayor continuidad entre la matriz cementante y la superficie del vidrio, evidenciando una interfase más integrada. Esto sugiere que el proceso de activación mecánica sigue favoreciendo la interacción a pesar de los porcentajes mayores de sustitución.

Las micrografías 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. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Khmiri y colaboradores [86], quienes observaron mediante SEM que, con el incremento de la edad de curado, las partículas de vidrio tienden a recubrirse progresivamente por geles 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 33 para VA y en la figura 34 para VP.



**Figura 33.** Calorimetría de morteros diferentes porcentajes de sustitución de VA; Flujo de calor y calor acumulado.



**Figura 34.** Calorimetría de morteros con diferentes porcentajes de sustitución de VP;

Flujo de calor y calor acumulado.

En todas las curvas se presentó 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  $C_3S$ , 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 observó 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. A edades tempranas, el vidrio no contribuye a la generación de calor, por lo que la cinética mostrada en las gráficas anteriores se ve dominada por el CP.

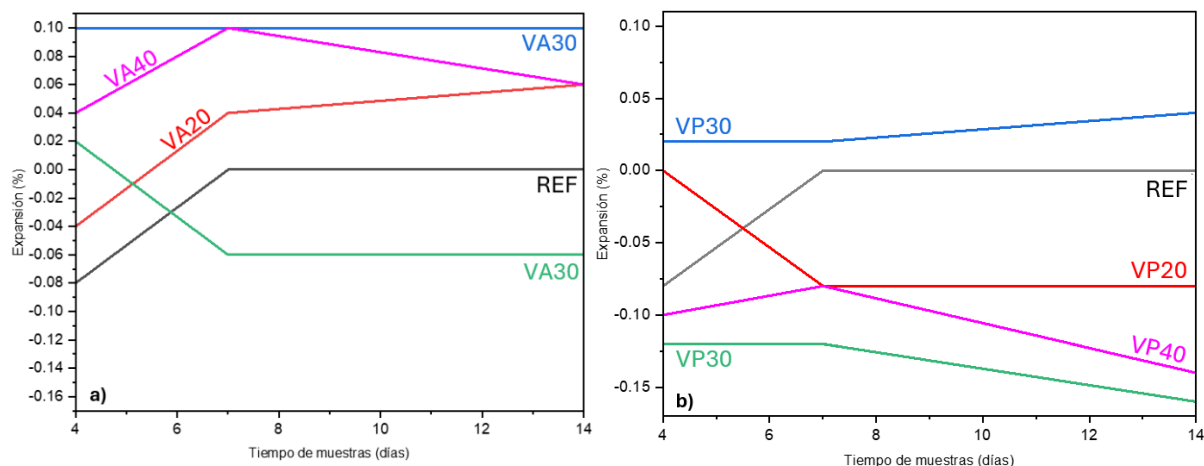
Sin embargo, aunque se esté presentando un retraso en la hidratación a tempranas edades, la gráfica de calor acumulado demostró que las curvas mantienen una pendiente continua, lo que sugiere que la reacción puzolánica del vidrio contribuye gradualmente a la hidratación a edades posteriores. Particularmente, las muestras con 20 y 30% de sustitución de CP por vidrio son las que demuestran un comportamiento más cercano al del mortero REF. Según Chang y colaboradores[74], las muestras con alto contenido de vidrio generan un valor menor de pico de aceleración y un mayor tiempo para alcanzarlo.

Esto concuerda también con los datos obtenidos para la gráfica de calor acumulado, donde a mayor contenido de vidrio, menor calor total liberado; obteniendo disminuciones de 16%, 27%, 37% y 46% para las muestras VA con sustituciones de 20%, 30%, 40% y 50%, respectivamente; mientras que para las muestras VP se obtuvieron disminuciones de 15%, 36%, 59% y 78% para las sustituciones de 20%, 30%, 40% y 50%, respectivamente.

Se evidenció, 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 [87]. Por ello resulta fundamental analizar la expansión de las muestras, ya que este proceso podría afectar el comportamiento y durabilidad del mortero.

La figura 35 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 35.** Expansión de morteros a 14 días donde a) VA y b) VP.

En la figura anterior 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 [57]. 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.

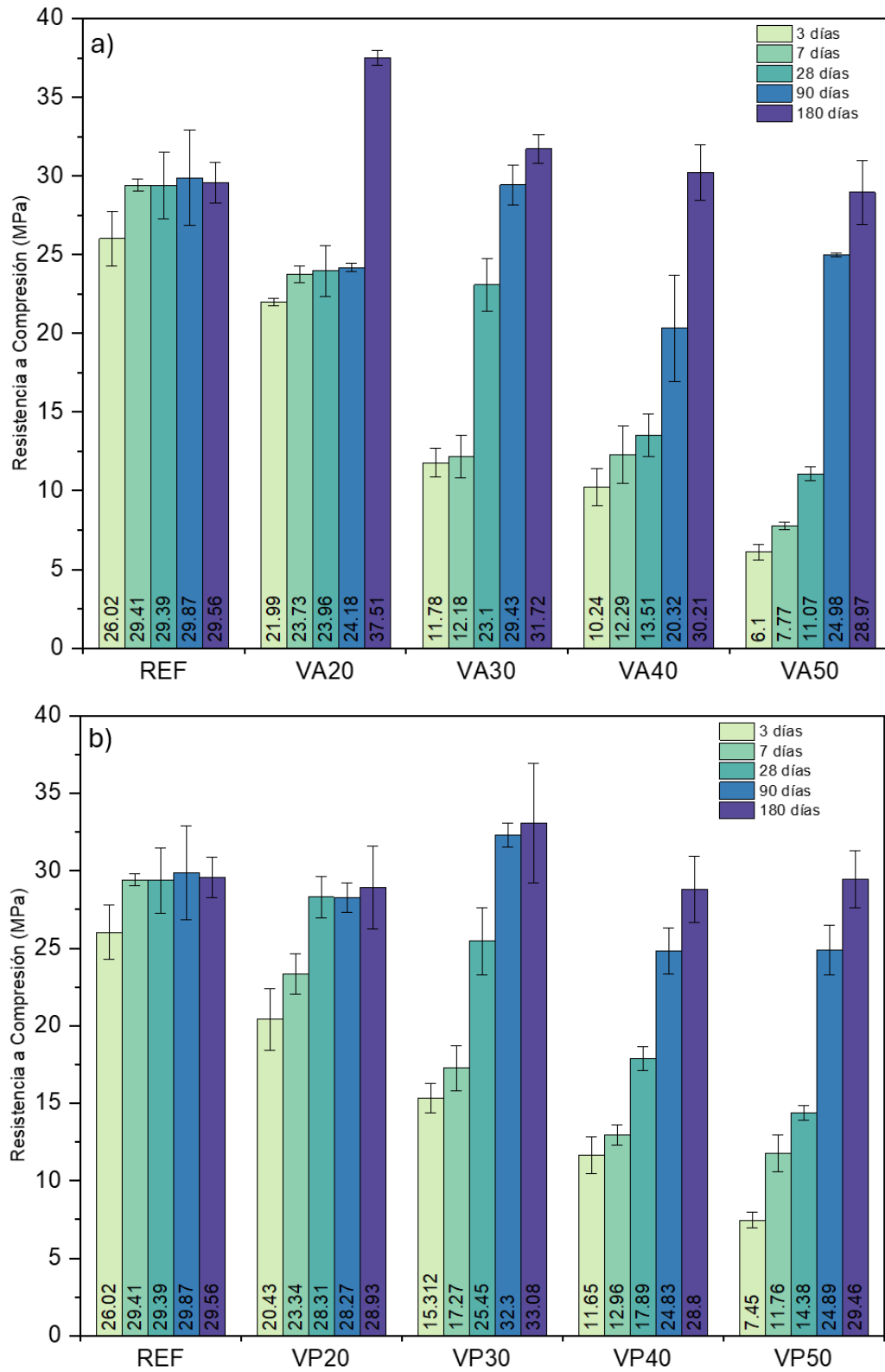
Según Dhir y colaboradores [88] la disolución de vidrio en soluciones acuosas puede generar dos procesos distintos: uno en el que la red vítrea se vuelve más abierta, permitiendo la absorción del agua y provocando expansión; y otro donde la sílice del vidrio se disuelve gradualmente, reaccionando con el calcio en la solución para formar geles CSH.

Los resultados obtenidos exhiben que las muestras VA presenta expansiones positivas, destacando principalmente la muestra VA40, que alcanzó el valor máximo registrado y la muestra VA30 que no tuvo cambios con el paso de los días, pero su expansión demuestra que se mantuvo en el rango límite permitido por la normativa. 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 RAS.

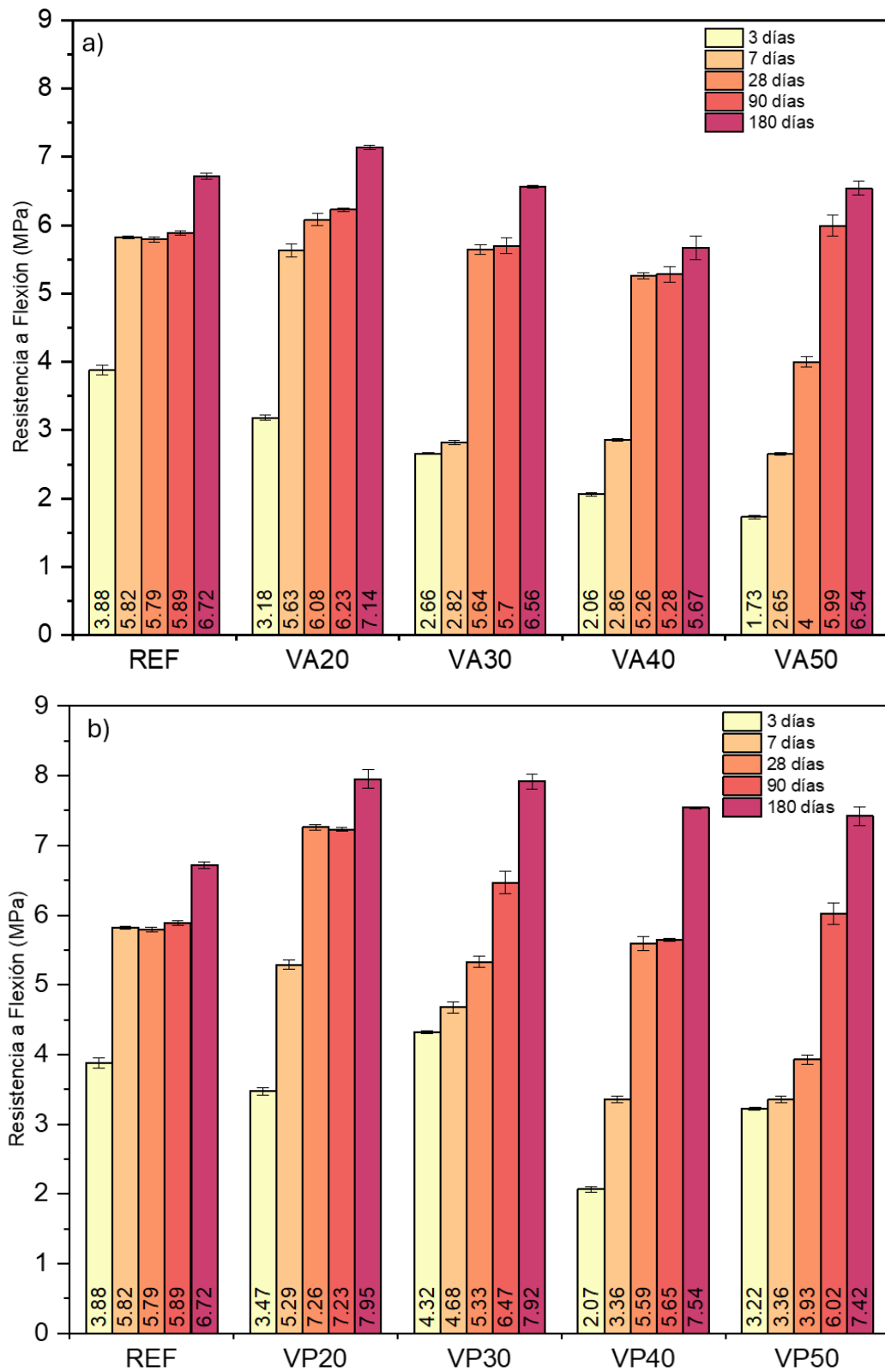
Con el fin de analizar el segundo proceso descrito de Dhir y colaboradores, relacionado con la formación de geles CSH, y para analizar las propiedades mecánicas de los morteros, se realizaron los ensayos de la resistencia a compresión y a la flexión. Los resultados son presentados en las figuras 36 y 37, respectivamente.

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 la compresión y 3.88, 5.82, 5.79, 5.89 y 6.72 MPa para las mismas edades de curado en la resistencia a la flexión.

Según Nahi y colaboradores [76] la disminución de las resistencias mecánicas a edades tempranas se puede explicar por la lenta y baja reactividad puzolánica del vidrio en estos periodos de tiempo, por lo que el vidrio sólo está actuando como material inerte y esto limita la formación de los geles CSH, aunque este mismo material sigue actuando como relleno.



**Figura 36.** Resistencia a la compresión de morteros con diferentes porcentajes de sustitución donde; a) VA y b) VP.



**Figura 37.** Resistencia a la flexión de morteros con diferentes porcentajes de sustitución

donde; a) VA y b) VP.

Todas las mezclas con sustitución de CP por VSC presentaron disminuciones significativas en la resistencia a edades tempranas (3 y 7 días), siendo más pronunciadas conforme se tenía un aumento del porcentaje de reemplazo. Las reducciones iniciales en la resistencia a la compresión alcanzaron hasta un 76% de disminución en sustituciones del 50%. A los 28 días de curado, las mezclas con 20% de sustitución mostraron reducciones moderadas y cercanas a la muestra REF, mientras que las del 30% evidenciaron ligeras disminuciones. En cambio, las sustituciones del 40% y 50% mantuvieron pérdidas considerables.

A los 90 y 180 días se observó una recuperación progresiva de la resistencia a compresión, especialmente en las sustituciones de 20% y 30%, donde incluso se logró alcanzar o superar los valores de la muestra REF.

En cuanto a la resistencia a flexión, el comportamiento fue similar al de la resistencia a la compresión, pero menos crítico. A 28 días, las mezclas con 20% de sustitución mostraron valores comparables o superiores a la muestra REF, mientras que los porcentajes mayores mantuvieron reducciones, aunque con la tendencia a mejorar a edades de curado tardías. Esto concuerda con lo mencionado por diversos autores, la incorporación de VSC en altas tasa de reemplazo (30, 40 y 50%), reduce las resistencias a edades tempranas (28 días) a la compresión debido a la reducción del contenido de CP.

Las mezclas con 20% y 30% de sustitución muestran tendencias similares con lo reportado en la literatura [76,89,90], donde se han registrado reducciones de la resistencia a la compresión que oscilan entre el 17% y 22%; mientras la resistencia a la flexión determina aumentos del 20% para algunos trabajos [89] o reducciones mínimas del 5%

[76], esto variando dependiendo del tipo de proceso que se utilice para la incorporación del vidrio.

Por otro lado, para los porcentajes de sustitución superiores al 40% y 50% se observaron tendencias similares, registrándose reducciones aproximadas del 30% para la resistencia a compresión. No obstante, las resistencias a la flexión mostraron una tendencia particular, en la que inicialmente se observaron incrementos en la resistencia, seguidos de una disminución conforme se aumentó el porcentaje de vidrio como sustituto.

La comparación entre las mezclas VA y VP evidencian que el proceso de activación influyó en el desarrollo de las resistencias mecánicas. En general, las mezclas VP presentaron menores pérdidas de resistencia a edades tempranas. Estos resultados pueden atribuirse a la reducción del tamaño de partícula generado por la activación mecánica, lo que favoreció la reactividad del vidrio.

Resultados similares fueron reportados por Vijayakumar y colaboradores [91] y Tamanna y Tuladhar [92]. Vijayakumar y colaboradores determinaron que la resistencia a flexión se incrementa cuando el tamaño de partícula del vidrio es comparable al del CP, favoreciendo una mejor distribución y efecto de relleno. Por su parte, Tamanna y Tuladhar confirmaron que el uso de partículas de vidrio de mayor tamaño de partícula que el CP provoca una disminución de esta propiedad mecánica, debido a una interacción menos eficiente entre la matriz cementante y el vidrio.

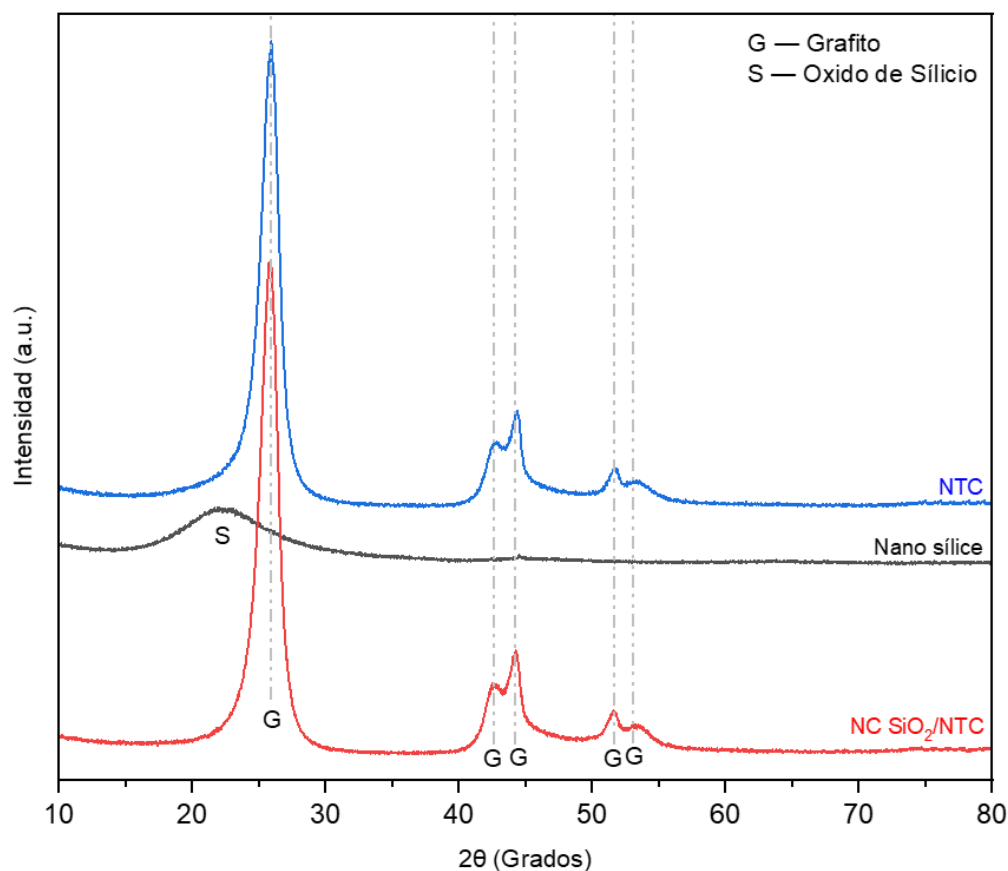
Por lo tanto, se demostró que el vidrio presenta una reacción puzolánica de carácter lento, por lo que las resistencias mecánicas tienden a incrementarse con el avance del curado. Este comportamiento se logró observar al obtener mejores propiedades mecánicas

a edades tardías (90 y 180 días), debido a que esto demuestra que el óxido de Silicio, presente en el vidrio, reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  generado durante la hidratación del cemento [35,90].

De igual manera, según lo propuesto por Dhir y colaboradores [88], se permite establecer una correlación entre los procesos y el comportamiento mecánica. Las muestras VA reflejan el primer proceso, donde la red vítrea 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 $\text{SiO}_2$ /NTC en morteros con diferentes porcentajes de sustitución.**

Una vez analizado el comportamiento del vidrio, con y 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 38.

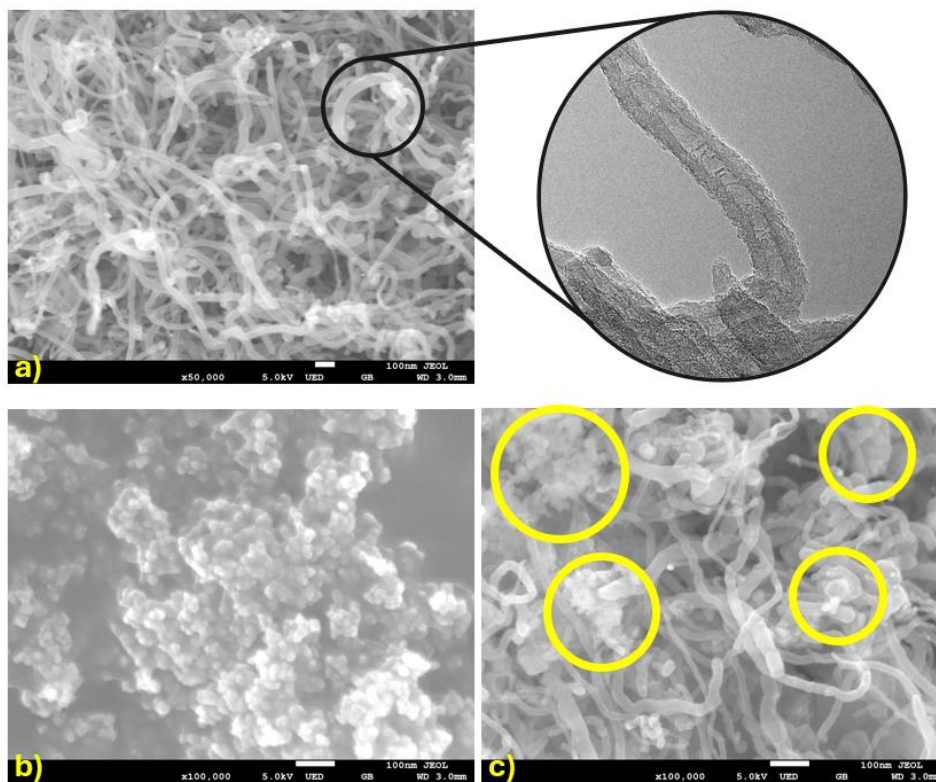


**Figura 38.** XRD de los nanomateriales y el nanorefuerto.

En esta figura se muestra los diversos difractogramas de los nanomateriales, para la nSiO<sub>2</sub> se muestra una señal ancha en 2 theta 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 pureza del material.

El nanorefuerto, 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 que la cantidad de nSiO<sub>2</sub> 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 éste es efectiva, así como determinar si la  $\text{nSiO}_2$  se encuentra adherida a los NTC. Las micrografías tomadas se muestran en la figura 39.



**Figura 39.** Micrografías de materias primas; a) NTC, b)  $\text{nSiO}_2$  y c) Nanorefuerzo NTC/ $\text{SiO}_2$ .

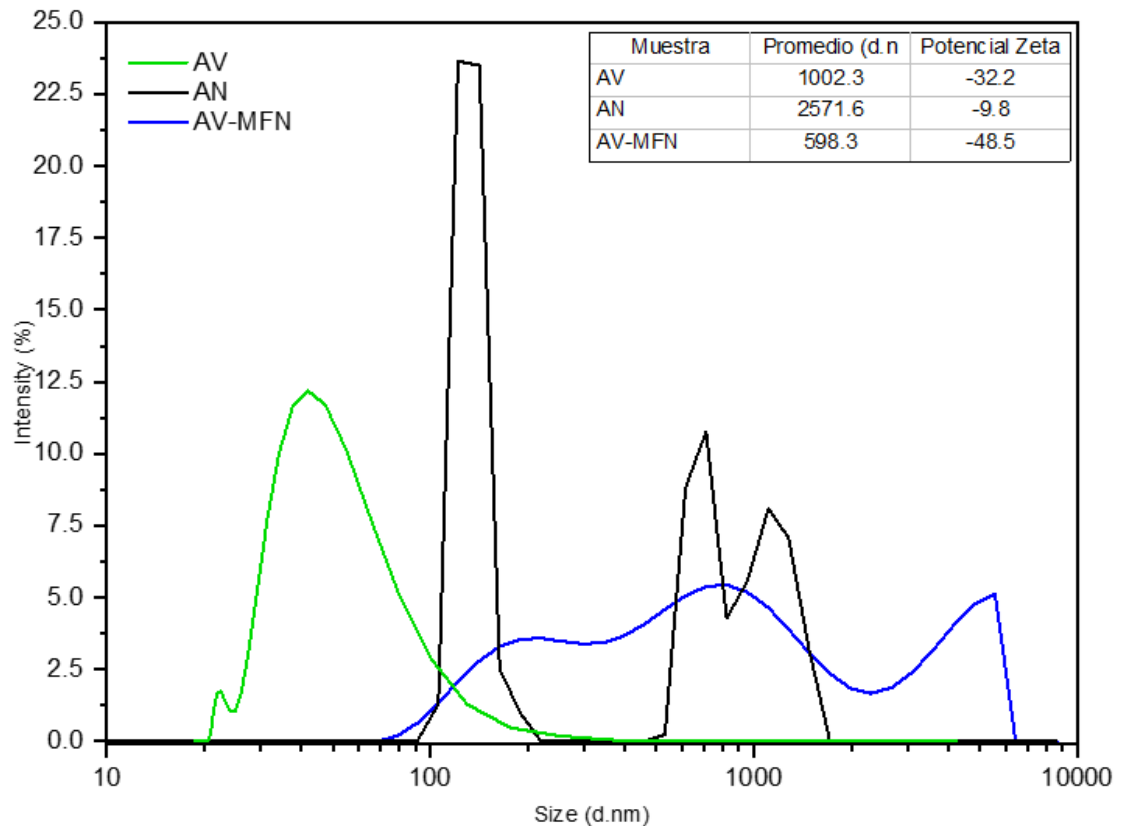
En la figura anterior se exhibe, en el inciso a, los NTC los cuales cuentan con diámetros internos de entre 0.0188 y 0.0384 nm y su morfología alargada y delgada, con un acercamiento a los NTC, demostrando que son huecos. A continuación, en el inciso b se muestra la  $\text{nSiO}_2$  con tamaños entre 0.2 y 1.8 nm y su morfología irregular y aglomerada.

Por último, en el inciso c aparece el nanorefuerto realizado, en donde se señala la  $nSiO_2$  en los círculos amarillos. Dentro del nanorefuerto hay partículas con tamaños de entre 0.0131 y 0.03967 nm para los NTC y de entre 0.02261 y 0.0603 nm para la  $nSiO_2$ .

En la figura 40 se puede observar el análisis DLS de tamaño de partícula obtenido mediante DLS y los valores del potencial Z para las muestras:

- AV – Agua con vidrio.
- AN – Nanorefuerto en agua.
- AV-MNF – Agua con vidrio activado mecánicamente, filtrado y con adición del nanorefuerto de  $SiO_2$ /NTC.

Esta prueba fue realizada con la finalidad de evaluar la dispersión, estabilidad y el grado de aglomeración de las partículas en dispersión antes de su incorporación al mortero.



**Figura 40.** Análisis DLS del agua con vidrio para dispersión del nanorefuerzo.

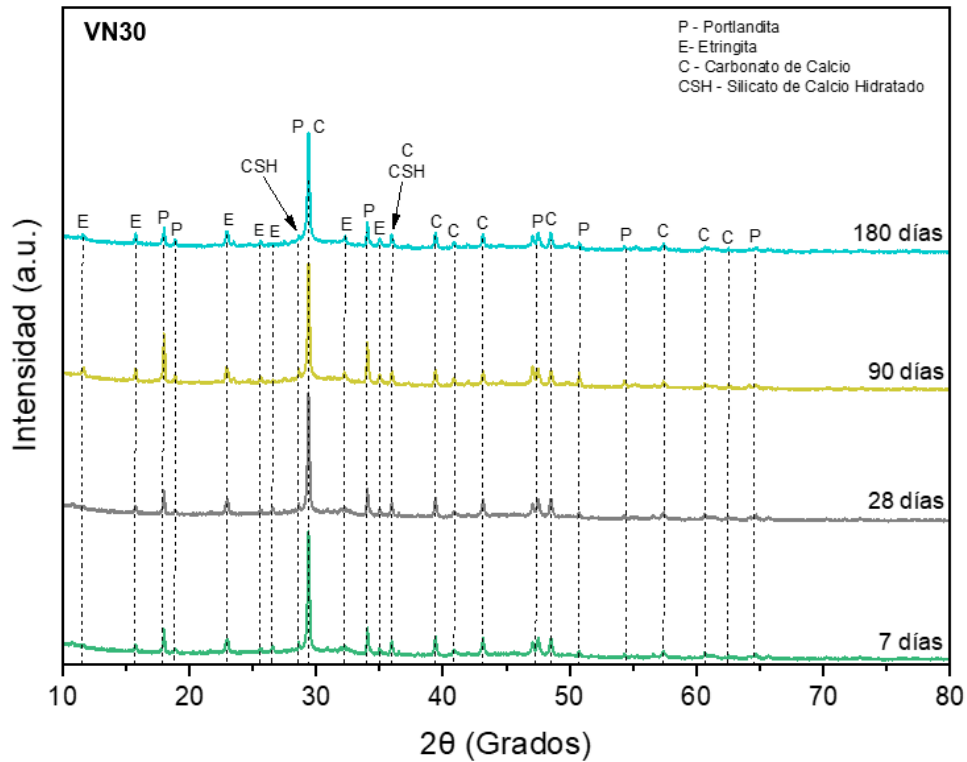
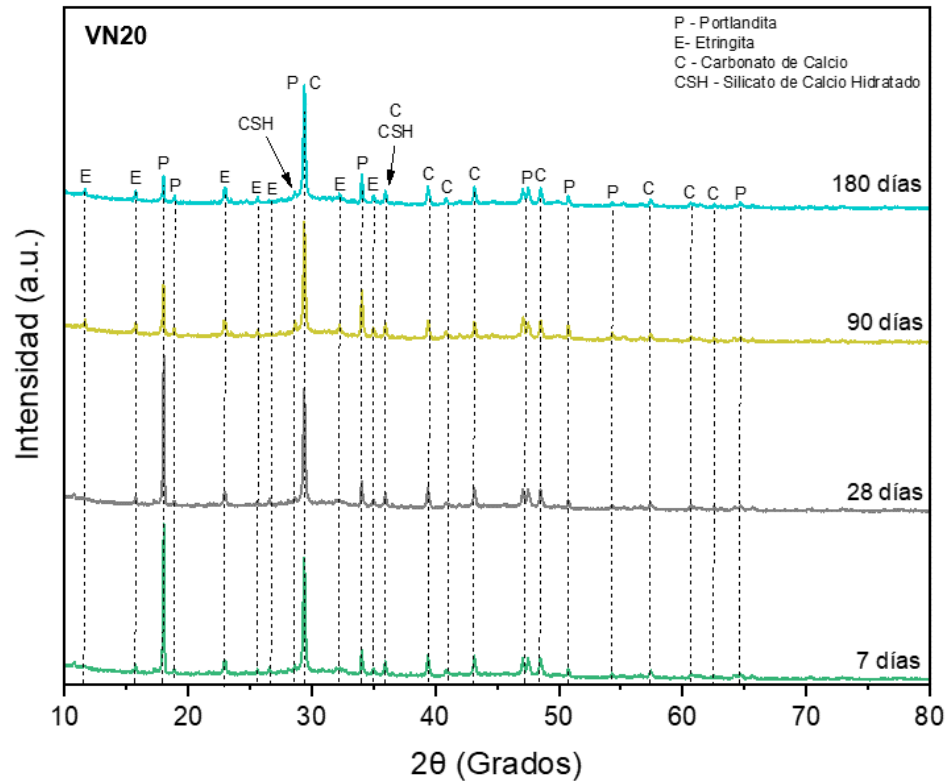
La figura demostró que la muestra AN presentó los tamaños de partícula mayores, teniendo un promedio de 2571.6 nm, lo que evidencia la tendencia del nanorefuerzo a aglomerarse cuando se dispersa únicamente en agua; esto concuerda con lo mencionado por Adhikary y colaboradores [93] quienes mencionan que los materiales a escala nanométrica tienen la tendencia a aglomerarse, lo cual puede perjudicar las propiedades microestructurales y mecánicas de los materiales cementantes. Por su parte, AV mostró un tamaño promedio cercano a 1002 nm, asociado a la presencia de partículas de vidrio con cierta aglomeración moderada.

En contraste con las muestras individuales de vidrio y nanorefuerzo, AV-MFN presento un menor tamaño promedio de 598 nm, lo que indica que, posterior a la activación mecánica y filtrado de agua, se tiene una mejor dispersión de las partículas.

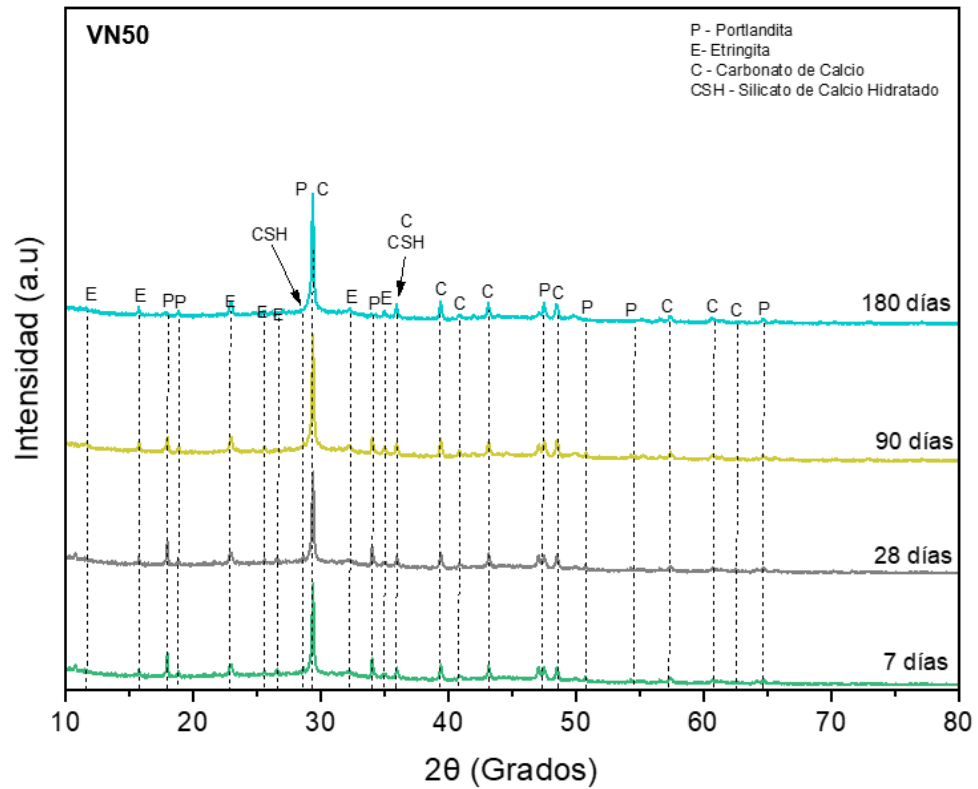
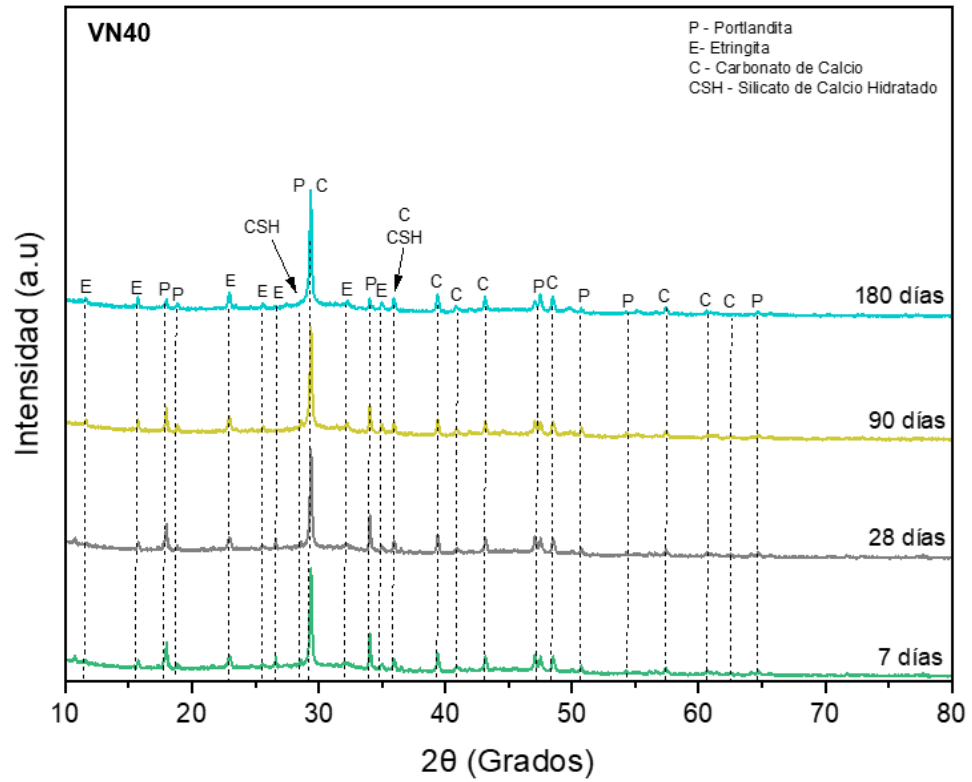
Este comportamiento se confirmó con los valores de potencial Zeta. Según la teoría DVLO [94,95], un sistema puede considerarse estable si la repulsión electrostática domina las fuerzas de Van Der Waals. Las partículas deben superar una barrera energética de repulsión electrostática para acercarse y formar aglomeraciones.

En este caso, la muestra AN registro una baja estabilidad con -9.8 mV, AV mostró una estabilidad moderada con -32.2 mV y la muestra AV-MFN alcanzó valores de -48.5 mV, demostrando una alta estabilidad coloidal y menor tendencia a la aglomeración. En conjunto, los resultados evidenciaron que el nanorefuerzo por sí solo presenta una baja estabilidad, mientras que al adicionarlo con la combinación de activación mecánica y el filtrado del vidrio se logró mejorar la dispersión y estabilidad del sistema.

El análisis XRD de las diferentes muestras, con los diferentes porcentajes de vidrio y la adición del nanorefuerzo, se presenta en las figuras 41 y 42.



**Figura 41.** XRD de pastas de 20% y 30% de sustitución de vidrio con adición del nanorefuerso a 7, 28, 90 y 180 días.

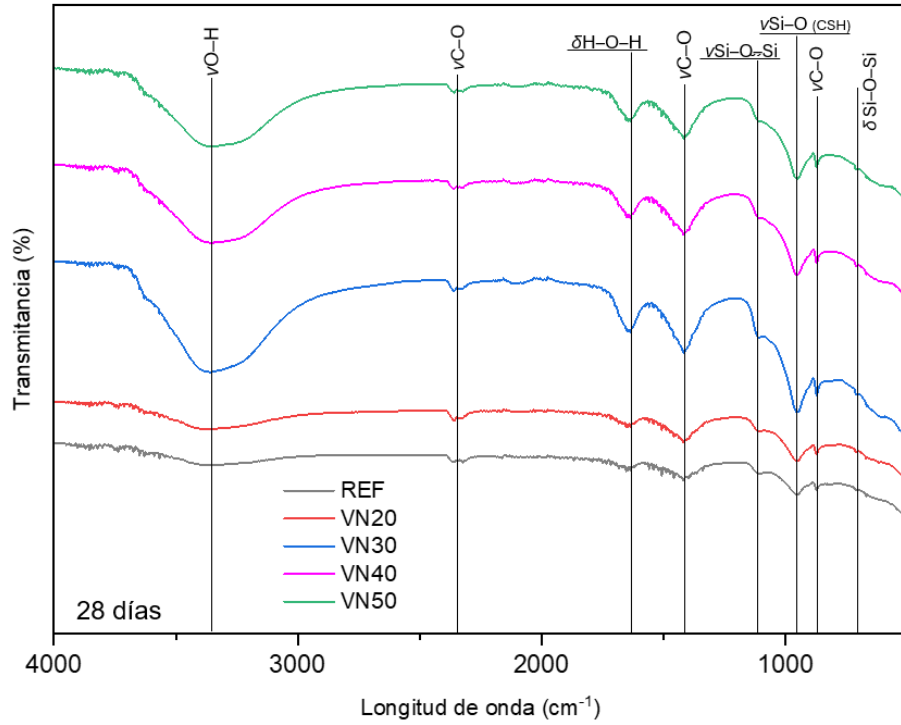


**Figura 42.** XRD de pastas de 40% y 50% de sustitución de vidrio con adición del nanorefuerto a 7, 28, 90 y 180 días.

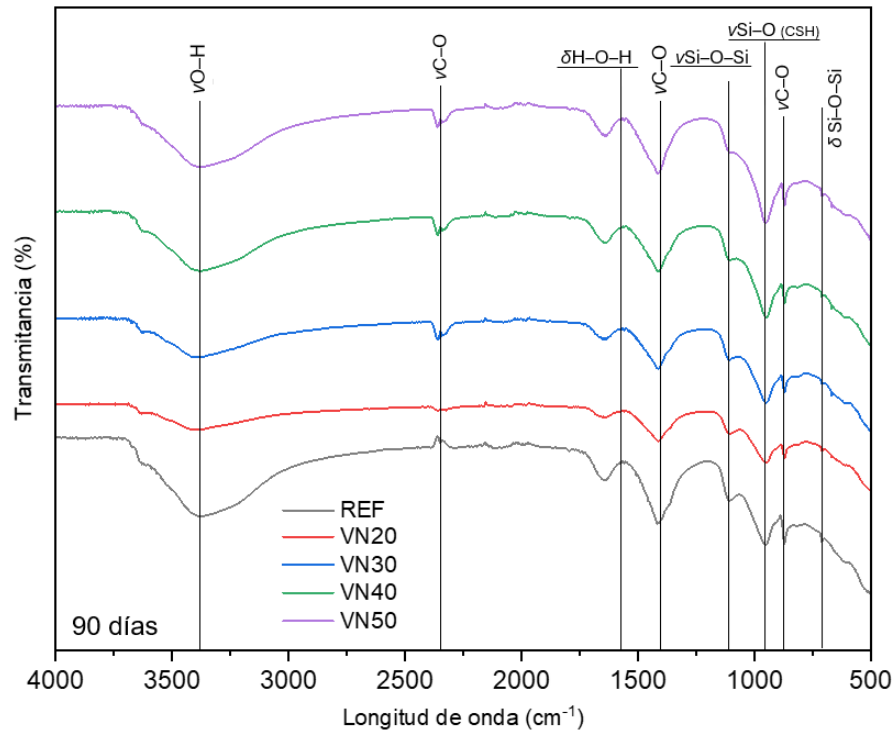
De la misma manera a los difractogramas de las muestras VA y VP, las muestras VN presentan las señales características de los morteros, con las variaciones de intensidad en sus picos dependiendo de la cantidad de vidrio utilizada.

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 [82–84]. Además, no se observa un cambio significativo por la adición del nanorefuerzo, lo que indica que la utilización de este material no afecta la estructura cristalina de los productos de hidratación ni promueve la formación de nuevas fases.

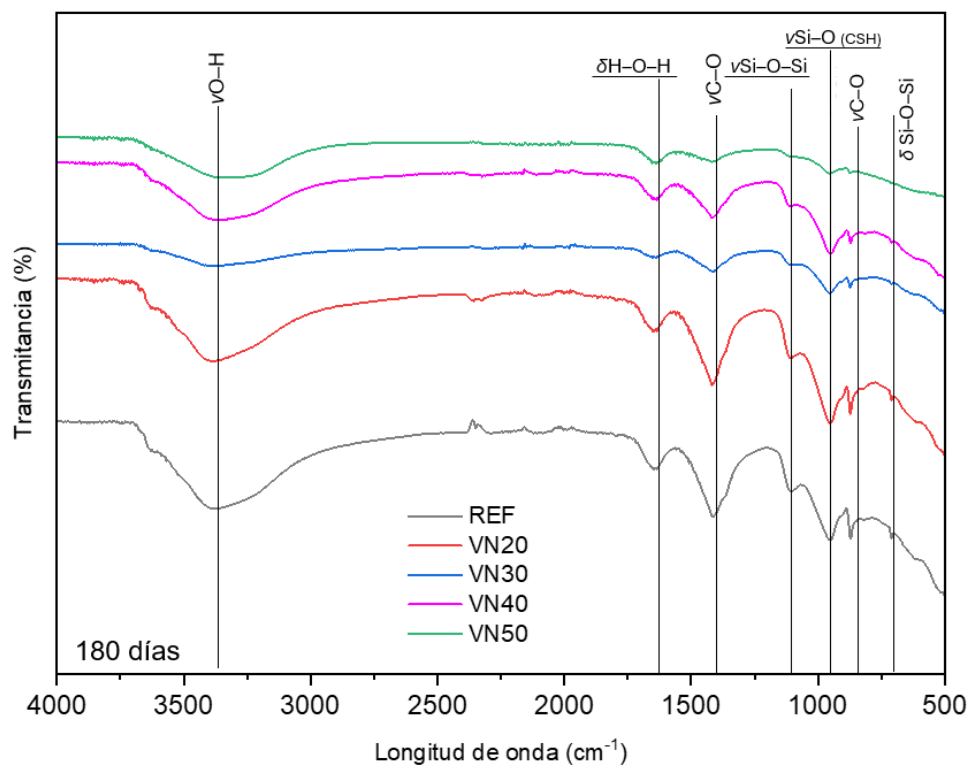
A continuación, se realizó el análisis FTIR correspondiente para determinar los posibles cambios por la adición del nanorefuerzo y el vidrio en conjunto, obteniendo los resultados mostrados en la figura 43, 44 y 45.



**Figura 43.** FTIR de pastas con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerto (VN) a 28 días de curado.



**Figura 44.** FTIR de pastas con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerto (VN) a 90 días de curado.

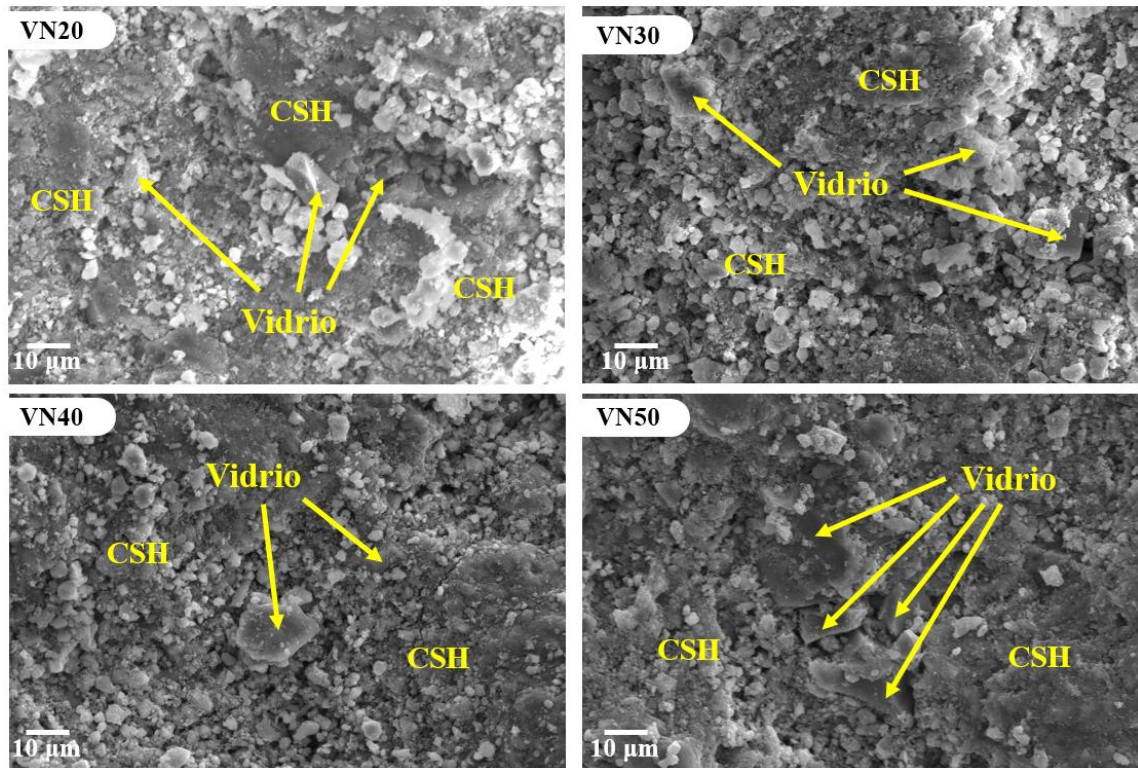


**Figura 45.** FTIR de pastas con vidrio activado mecánicamente y adición del nanoreinuerzo (VN) a 180 días de curado.

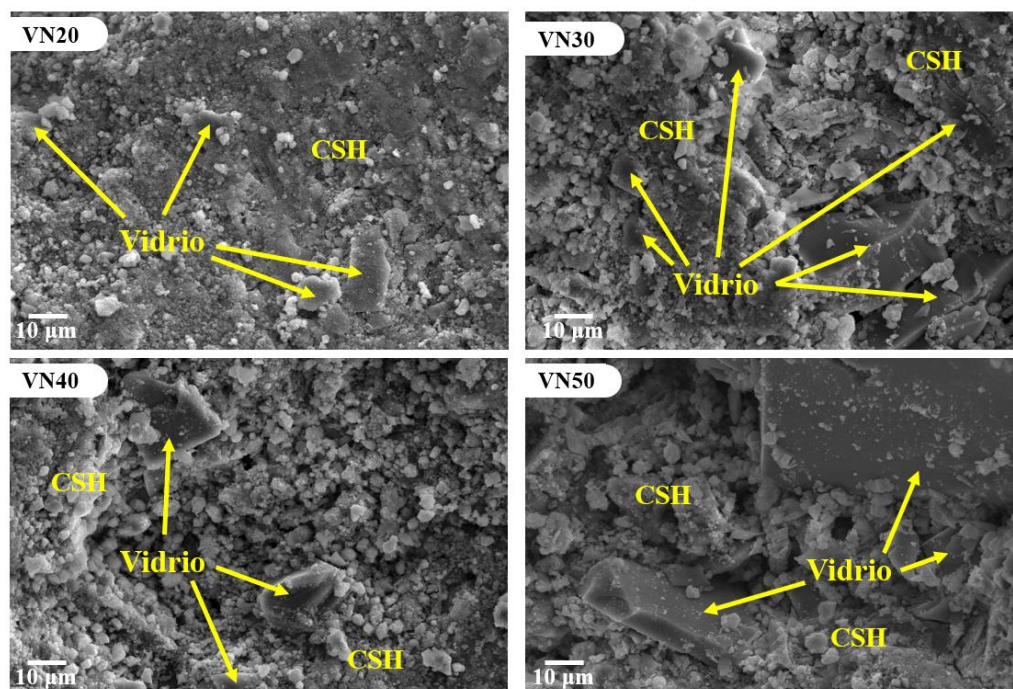
De igual manera que a las muestras VA y VP, las muestras VN presentan las bandas correspondientes a los grupos funcionales de cada muestra para morteros. Se presenciaron las mismas variaciones que en las muestras VA y VP, con una ligera disminución del  $\text{SiO}_2$  en la longitud  $950 \text{ cm}^{-1}$ .

Así mismo, las muestras presentaron una disminución en la señal correspondiente al  $\text{OH}^-$ , lo que se puede relacionar con una menor absorción de agua [85]; sin embargo, a edades mayores se observa como la absorción pasa a ser mayor para las muestras VN30, VN40 y VN50.

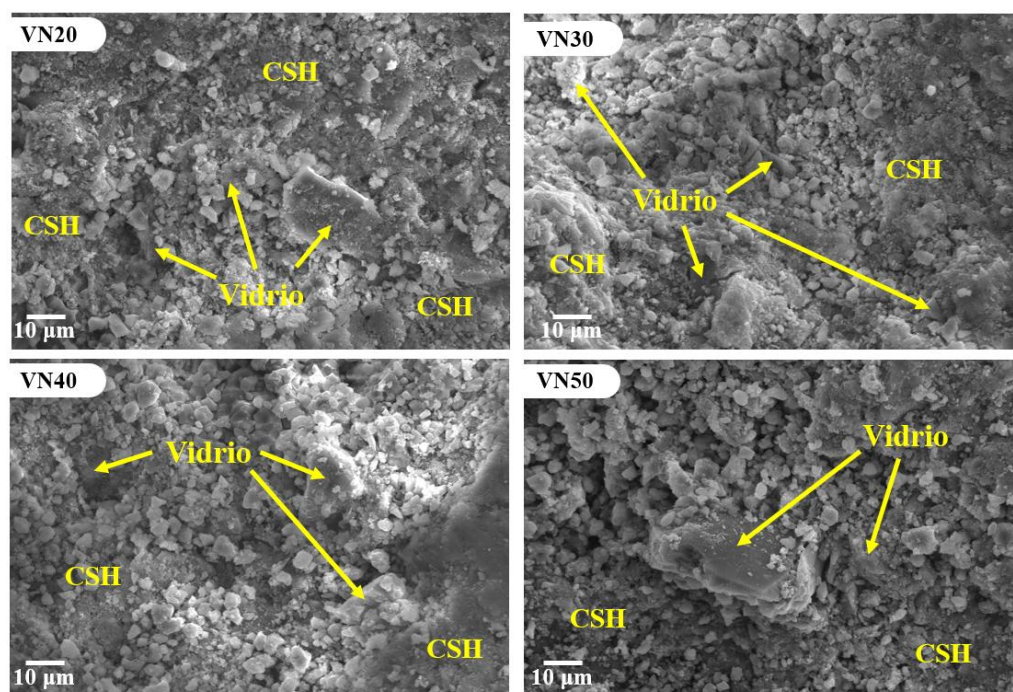
En la figura 46, 47 y 48 se presentan las micrografías SEM correspondientes a los morteros con diferentes porcentajes de sustitución de vidrio, tiempos de curado y la adición del nanorefuerto.



**Figura 46.** Micrografías de morteros con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerto (VN) a 28 días.



**Figura 47.** Micrografías de morteros con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerto (VN) a 90 días.



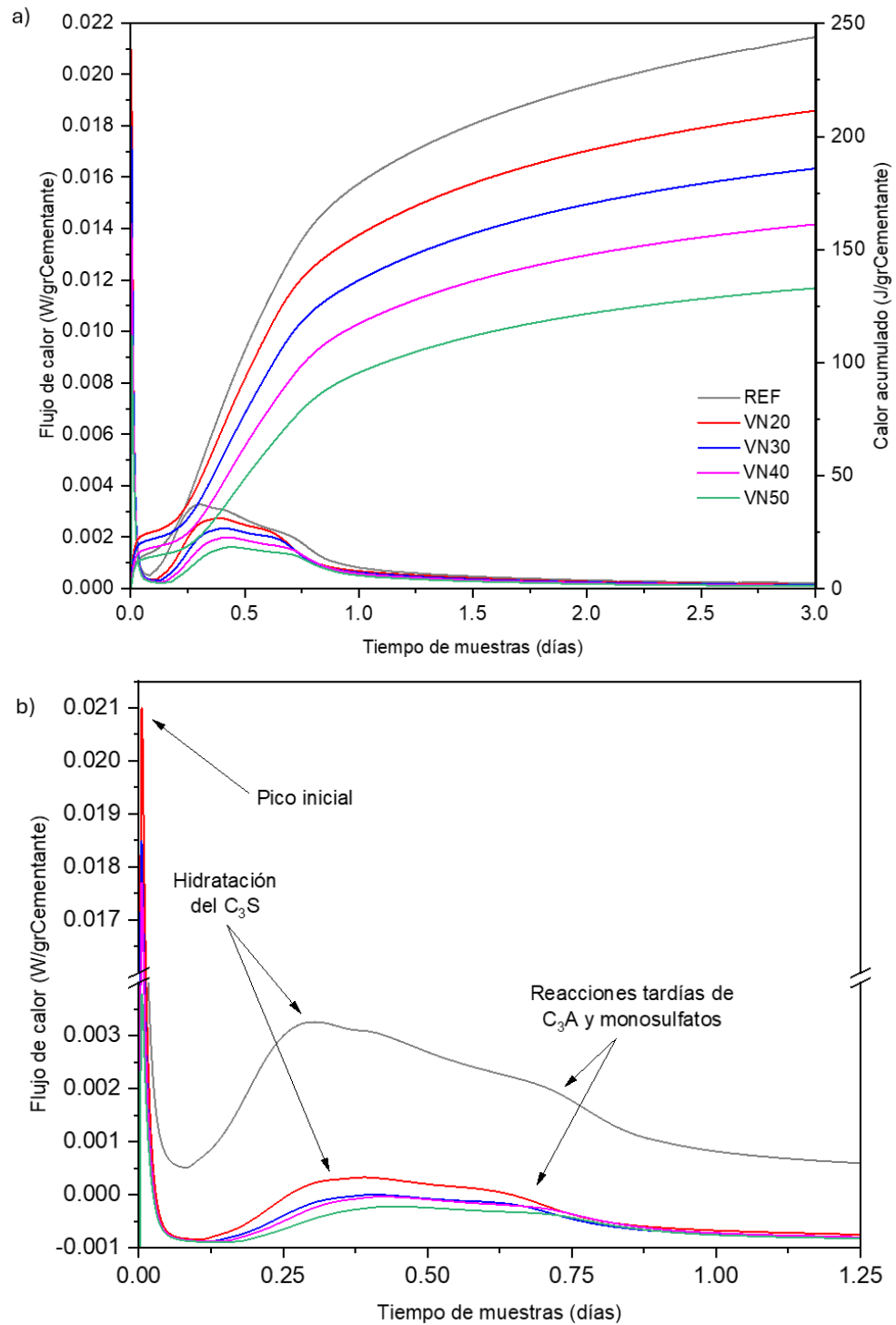
**Figura 48.** Micrografías de morteros con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerto (VN) a 180 días.

A los 28 días, las muestras presentaron 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 favoreció la nucleación de los productos y la formación de los geles.

A los 90, se evidencio 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 está teniendo una interacción puzolánica más activa, posiblemente siendo promovida por el nanorefuerzo y las edades altas de curado.

A los 180 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 49.

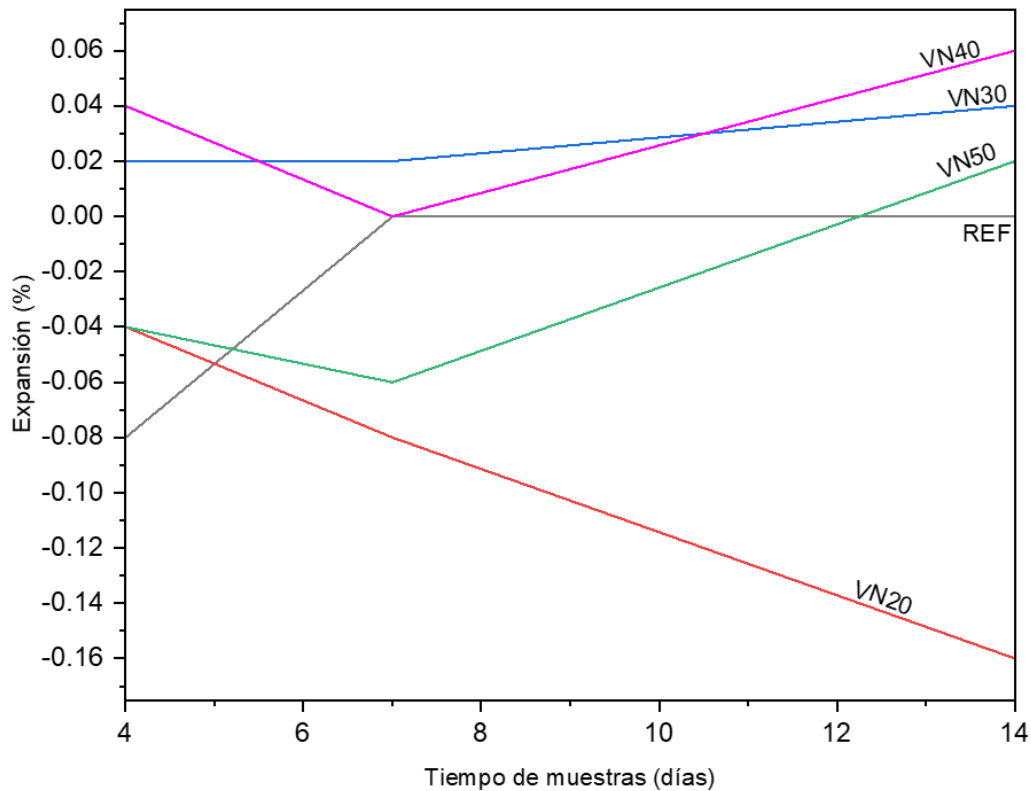


**Figura 49.** Calorimetría de morteros con vidrio activado mecánicamente y adición de nanoreinuerzo (VN); a) Flujo de calor y Calor acumulado, b) Acercamiento Flujo de calor.

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  $C_3S$ . Sin embargo, se puede observar una disminución considerable en las muestras VN con respecto a REF e incluso a las muestras sin adición del nanorefuerto (VA y VP). No obstante, las muestras VN mantiene la tendencia de la curva de calor acumulado; obteniendo disminuciones del 13.2%, 33.5%, 55.96 % y 76% para los porcentajes de 20%, 30%, 40% y 50% de sustitución, respectivamente.

La adición del nanorefuerto modifica la cinética de hidratación, esto viéndose evidenciado en la reducción de pico principal de hidratación y la disminución del calor acumulado, siendo similar a lo obtenido por Chang y colaboradores [74]. En contraste con las muestras VP, las muestras VN, que incorporan el nanorefuerto demostraron una disminución de calor acumulado menor; esto se puede atribuir a que el nanomaterial favorece la formación temprana de geles CSH, compensando la disminución de calor asociada al reemplazo de cemento. Esto coincide con lo mencionado por Björnström y colaboradores [96] quienes mencionan que la adición de  $nSiO_2$  ayuda a mitigar la reducción de la señal causada por la sustitución del cemento. De igual manera, Konsta-Gdoutos y colaboradores [97] determinaron que la correcta dispersión de los nanomateriales favorece la cinética de hidratación.

La figura 50 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 nanorefuerto.



**Figura 50.** Expansión de morteros con vidrio activado mecánicamente y con adición de nanorefuerzo (VN) a 14 días.

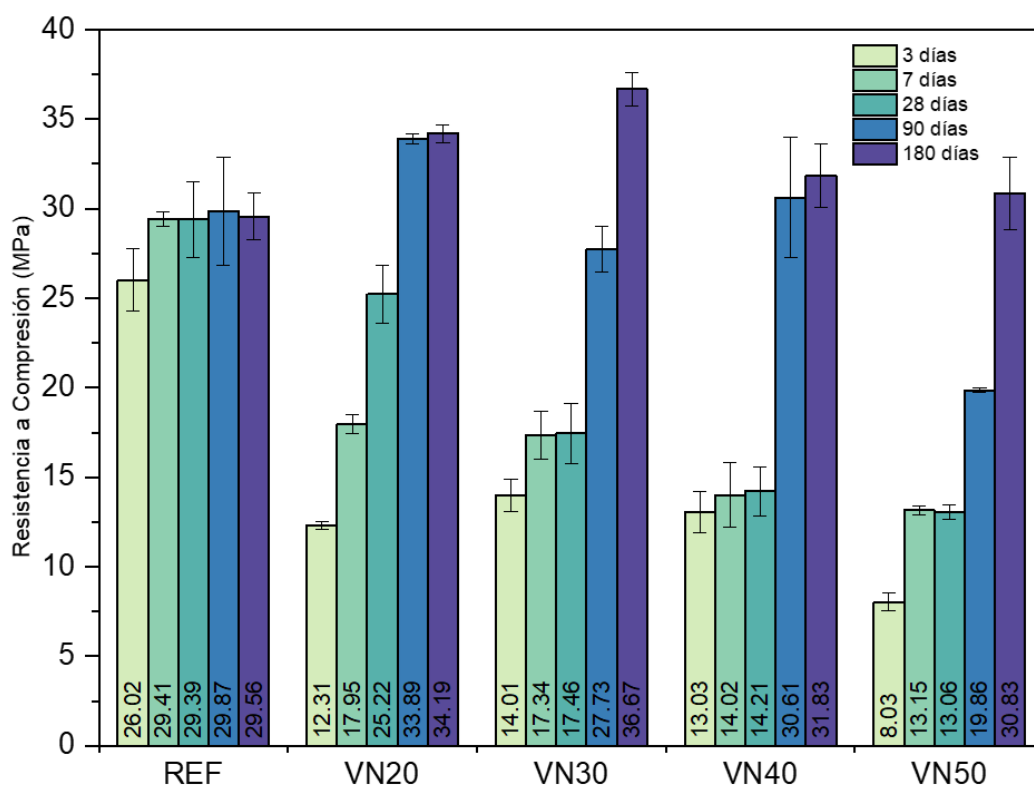
Conforme a la evaluación dictada por la ASTM C1567 [57], ninguna de las muestras superó el límite de 0.10% establecido por la normativa para considerar a un material como potencialmente reactivo antes la RAS.

La mezcla VN20 presentó una contracción aproximada de -0.16%, indicando la ausencia de expansión, lo cual podría asociarse a la reactividad. En contraste, las mezclas VN30, VN40 y VN50 presentaron expansiones cercanas a 0.04%, 0.06% y 0.02%, respectivamente. Aunque estos valores se consideran expansiones bajas y no alcanzan los niveles indicativos en la normativa, por lo que se pueden clasificar como expansiones leves. Esto concuerda con lo mencionado por Göksen y colaboradores [98], quienes

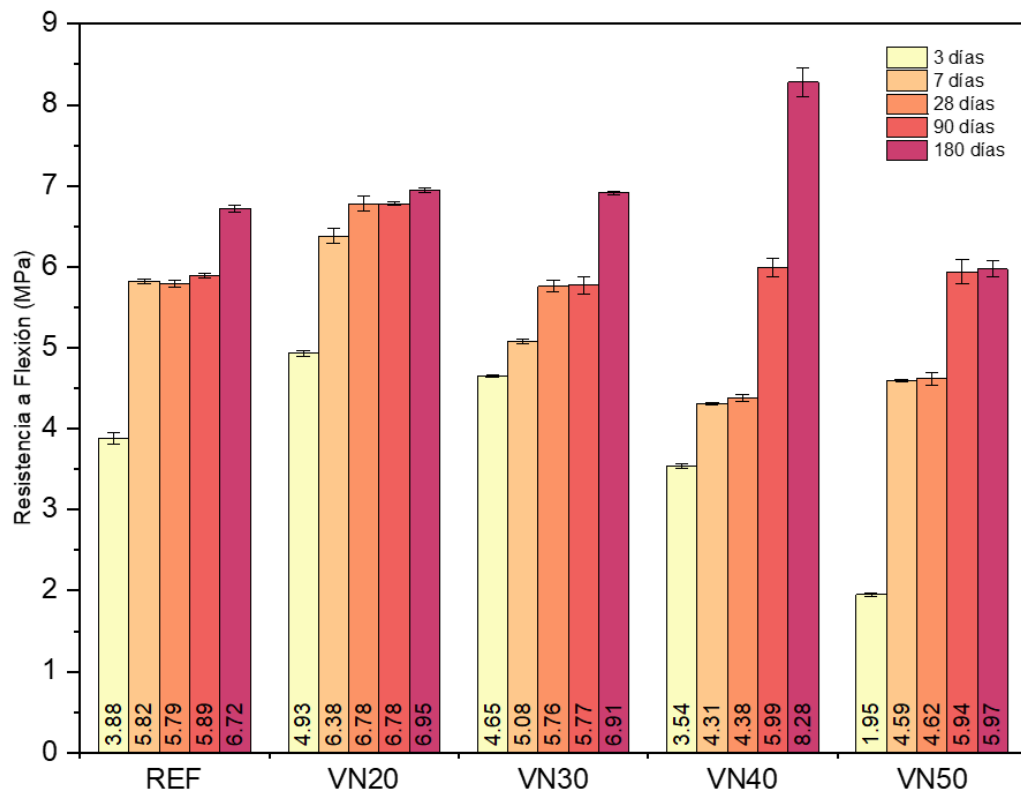
determinaron que el uso de vidrio en las muestras reduce la expansión. De igual manera, Yang y colaboradores [99], después de un exhaustivo análisis de literatura, determinaron que la adición de  $n\text{SiO}_2$  y NTC demuestran efectos mitigantes similares, mejorando el control de la expansión por RAS en ensayos acelerados como el ASTM C1567.

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

Una vez realizado esto, se procedió a analizar los resultados de resistencia a la compresión y a la flexión de las muestras VN, los cuales se presentan en las figuras 51 y 52.



**Figura 51.** Resistencia a la compresión de los morteros con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerzo (VN).



**Figura 52.** Resistencia a la flexión de los morteros con vidrio activado mecánicamente y adición del nanorefuerto (VN).

En las figuras 51 y 52 se puede observar una tendencia similar a la vista en las figuras 36 y 37, siendo que en las edades tempranas de curado del mortero se mantiene la disminución del rendimiento mecánico. No obstante, las edades mayores, (90 y 180 días) presentan un comportamiento mecánico mayor a de la muestra control, con ciertas excepciones. Adicionalmente, se demuestra que la incorporación del nanorefuerto de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$  al mortero mejoró significativamente las propiedades mecánicas, siendo más notorio esto en las resistencias a flexión.

Las muestras VN20 presentaron resistencias a la compresión crecientes conforme el tiempo de curado (12.31 a 34.19 MPa). En comparación con la muestra REF, se obtuvieron reducciones a edades tempranas y una recuperación progresiva a lo largo del curado, alcanzando incrementos a 90 y 180 días, confirmado lo mencionado anteriormente con respecto a la reactividad puzolánica lenta del vidrio [35,90]. En flexión, los valores oscilaron entre 4.93 MPa y 6.39 MPa, manteniendo incrementos respecto a la muestra REF en todas las edades.

La mezcla VN30 desarrollo resistencias a la compresión de entre 14.01 y 36.67 MPa; mientras que, respecto a la resistencia a la flexión, los valores variaron de entre 4.65 a 6.91 MPa. La mezcla VN40 obtuvo resistencias a la compresión de 13.03 a 31.83 MPa y de 3.54 a 8.28 MPa para la resistencia a la flexión. Por último, la muestra VN50 presento resistencias de 8.03 a 30.83 MPa y de 1.95 a 5.97 MPa para resistencia a la compresión y a la flexión, respectivamente. Se mantuvo la tendencia de la reducción de resistencia a edades tempranas y la recuperación en edades tardías.

En comparación con lo reportado por Mendoza-Reales y colaboradores [3], quienes señalan que la  $n\text{SiO}_2$  favorece la resistencia a la compresión y los NTC contribuyen a la resistencia a la flexión mediante un “efecto de puente”, los resultados obtenidos muestran un comportamiento parcialmente coincidente. En las mezclas evaluadas se observa una mejora progresiva con la resistencia a la compresión a edades avanzadas, particularmente después de los 90 días, lo cual es consistente con el efecto puzolánico atribuido a la  $n\text{SiO}_2$ . Asimismo, la tendencia creciente en la resistencia a la flexión en edades mayores puede asociarse al posible efecto de refuerzo de los NTC dentro de la matriz. Sin embargo, también se evidencian reducciones importantes en edades tempranas, lo que concuerda

con lo mencionado por Mendoza-Reales et al. respecto a que la combinación de ambos nanorefuerzos puede afectar las propiedades mecánicas. De igual manera, el comportamiento observado coincide con lo reportado por Varisha et al. [50], quienes indican que las mejoras mecánicas asociadas a nanorefuerzos tienden a manifestarse con mayor claridad en edades superiores a 56 días.

A continuación, en la tabla IV y V se muestra una comparativa de las propiedades mecánicas de los morteros REF, VA, VP y VN evaluados en el presente trabajo.

**Tabla IV.**

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS REF, VA, VP Y VN A  
DIFERENTES EDADES DE CURADO.

| Muestras | Resistencia a la compresión (MPa) |         |          |
|----------|-----------------------------------|---------|----------|
|          | 28 días                           | 90 días | 180 días |
| REF      | 29.39                             | 29.87   | 29.56    |
| VA20     | 23.96                             | 24.18   | 37.51    |
| VP20     | 28.31                             | 28.27   | 28.93    |
| VN20     | 25.22                             | 33.89   | 34.19    |
| VA30     | 23.1                              | 29.43   | 31.72    |
| VP30     | 25.45                             | 32.3    | 33.08    |
| VN30     | 17.46                             | 27.73   | 36.67    |
| VA40     | 13.51                             | 20.32   | 30.21    |
| VP40     | 17.89                             | 24.83   | 28.8     |
| VN40     | 14.21                             | 30.61   | 31.83    |
| VA50     | 11.07                             | 24.98   | 28.97    |
| VP50     | 14.38                             | 24.89   | 29.46    |
| VN50     | 13.06                             | 19.86   | 30.83    |

**Tabla V.**

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE MORTEROS REF, VA, VP Y VN A  
DIFERENTES EDADES DE CURADO.

| Muestras | Resistencia a la flexión (MPa) |         |          |
|----------|--------------------------------|---------|----------|
|          | 28 días                        | 90 días | 180 días |
| REF      | 5.79                           | 5.89    | 6.72     |
| VA20     | 6.08                           | 6.23    | 7.14     |
| VP20     | 7.26                           | 7.23    | 7.95     |
| VN20     | 6.78                           | 6.78    | 6.95     |
| VA30     | 5.64                           | 5.7     | 6.56     |
| VP30     | 5.33                           | 6.47    | 7.92     |
| VN30     | 5.76                           | 5.77    | 6.91     |
| VA40     | 5.26                           | 5.28    | 5.67     |
| VP40     | 5.59                           | 5.65    | 7.54     |
| VN40     | 4.38                           | 5.99    | 8.28     |
| VA50     | 4.0                            | 5.99    | 6.54     |
| VP50     | 3.93                           | 6.02    | 7.42     |
| VN50     | 4.62                           | 5.94    | 5.97     |

Los resultados indicaron que la activación mecánica y la incorporación del nanorefuerzo de SiO<sub>2</sub>/NTC influyen en el desarrollo de las propiedades mecánicas de los morteros. Aunque se observa una disminución de las resistencias a edades tempranas, atribuible a la sustitución del CP por VSC, mientras a edades tardías se presenta la recuperación progresiva por la reactividad puzolánica lenta del vidrio.

El comportamiento variable de las resistencias mecánicas en las muestras VN puede atribuirse al procedimiento de activación mecánica de la mezcla. La incorporación del nanorefuerzo y su comportamiento en las resistencias mecánicas puede favorecer la densificación de la matriz, mejorando las resistencias a edades avanzadas; sin embargo, en otros puede alterar la hidratación inicial o generar zonas de aglomeración, lo que explicaría la diferencia en las tendencias de resistencias.

## **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/SiO<sub>2</sub>.

### **Conclusiones.**

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

1. La activación mecánica del VSC incrementó la reactividad puzolánica, siendo evidenciado por el aumento de pH y la liberación de iones alcalinos durante el proceso. No obstante, tiempos superiores a 3 h no generaron incrementos significativos, lo que indica un límite eficiente del proceso.
2. La activación mecánica mejoró el desempeño mecánico respecto a los morteros VA, alcanzando incrementos de hasta un 27% y 12% en resistencias a la compresión y la flexión, respectivamente, para los morteros VP. Los mejores resultados se obtuvieron en activaciones mecánicas de 3h, confirmando una mejor integración del vidrio en la matriz y una interacción más eficiente de los productos de hidratación.
3. Las sustituciones altas (30%, 40% y 50%) parcial de CP por VSC redujo la velocidad y el calor de hidratación respecto a la muestra REF, sin embargo, a 90 y

180 días se observaron recuperaciones de propiedades mecánicas, alcanzando incrementos de hasta 24% y 27% en las resistencias a la compresión y la flexión, respectivamente.

4. La activación mecánica del vidrio modifico el medio acuoso, favoreciendo la dispersión del nanorefuerzo de  $\text{SiO}_2/\text{NTC}$ . El incremento del pH promovió la formación de una matriz más densa y homogénea a edades avanzadas; sin embargo, una mala dispersión o aglomeración del nanorefuerzo afecta las propiedades mecánicas del mortero.
5. La incorporación del nanorefuerzo contribuyó a la densificación de la matriz y a las mejoras mecánicas a largo plazo, particularmente en la muestra VN30, donde se registraron incrementos de 21.39% y 2.51% de resistencia a la compresión y la flexión, respectivamente.
6. Ninguna mezcla superó el límite de 0.10% de expansión a 14 días conforme a ASTM C1567, registrando valores menores a 0.06%, lo que confirma que el uso del vidrio y el nanorefuerzo no generan un riesgo a la RAS.
7. En conjunto, la sustitución parcial del CP por VSC activado mecánicamente y con la adición de un nanorefuerzo es viable hasta un 50%; no obstante, el 30% de sustitución presentó el mejor equilibrio entre sus propiedades mecánicas.

### **Recomendaciones.**

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

1. Establecer diferentes procesos de dispersión para permitir que el nanorefuerzo tenga una mejor distribución en el mortero.

2. Estudiar el efecto del tipo de vidrio utilizado como sustituto del CP, considerando su composición química y tamaño de partícula.
3. Evaluar las propiedades mecánicas de morteros con vidrio como sustituto a edades mayores de curado, buscando determinar si la reacción puzolánica lenta del vidrio sigue actuando a más de 180 días.
4. Analizar la durabilidad de los morteros ante agentes agresivos como cloruros y sulfatos,
5. Determinar el comportamiento térmico y el impacto ambiental de la utilización de este tipo de morteros para su potencial ahorro energético.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS CONSULTADAS.

- [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] Z. Casar, A.K. Mohamed, P. Bowen, K. Scrivener, Atomic-Level and Surface Structure of Calcium Silicate Hydrate Nanofolds, *The Journal of Physical Chemistry C* 127 (2023) 18652–18661. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c03350>.
- [5] J. Antonio, P. Madrazo, S. Diego, C. Carlos, T. García, *Materiales de Construcción: los cementos.*, n.d.

<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2219/course/section/2101/Leccion9b.pdf>

(accessed April 21, 2024).

- [6] Expansión., Emisiones de CO<sub>2</sub> 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%20habita>  
nte (accessed April 21, 2024).

- [7] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Composición de residuos sólidos urbanos en México., (n.d.). [https://www.proyectosmexico.gob.mx/como-invertir-en-infraestructura-en-mexico/ciclo-inversion/residuos-solidos/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.proyectosmexico.gob.mx/como-invertir-en-infraestructura-en-mexico/ciclo-inversion/residuos-solidos/?utm_source=chatgpt.com) (accessed February 1, 2026).

- [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=\\*](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] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales., Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos., Ciudad de México, 2020.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf> (accessed February 1, 2026).

- [10] Gobierno del Estado de México, Programa de protección civil para basureros, 2018, 2018.  
[https://cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/sites/cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/files/files/programas%20de%20Prevencion/Programas%20pdf/programas%20logo%202018/PPC%20Basureros2018v1.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/sites/cgproteccioncivil.edomex.gob.mx/files/files/programas%20de%20Prevencion/Programas%20pdf/programas%20logo%202018/PPC%20Basureros2018v1.pdf?utm_source=chatgpt.com) (accessed February 1, 2026).
- [11] 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, 2023.  
<http://www.cleanairinstitute.org> (accessed April 22, 2024).
- [12] 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/RobayoNunezEstefania2013.pdf> (accessed May 20, 2024).
- [13] 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>.
- [14] 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](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf) (accessed April 15, 2025).

- [15] Mordor Intelligence, Mercado de Cemento Portland análisis de tamaño y participación - Tendencias y pronósticos de crecimiento hasta 2030., (2024).  
<https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/global-ordinary-portland-cement-market> (accessed November 19, 2025).
- [16] 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>.
- [17] 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).
- [18] K.L. Scrivener, R. Snellings, The Rise of Portland Cements, *Elements* 18 (2022) 308–313. <https://doi.org/10.2138/gselements.18.5.308>.
- [19] M.Á. SanJuan 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](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf) (accessed April 15, 2025).
- [20] E. Guzmán Domínguez, Caracterización de la Reactividad de Arcillas Calcinadas para su uso en Cementos Sostenibles., Maestría, Universidad Politécnica de Madrid, 2023.  
[https://oa.upm.es/88133/3/TFM\\_ALVARO\\_PICAZO\\_IRANZO.pdf](https://oa.upm.es/88133/3/TFM_ALVARO_PICAZO_IRANZO.pdf) (accessed February 2, 2026).

- [21] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori, Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry, *J. Clean. Prod.* 51 (2013) 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>.
- [22] M. Diez, Synthesis by supercritical fluids methods of advanced additions for cementitious materials, n.d. <https://www.researchgate.net/publication/324981319>.
- [23] 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>.
- [24] 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).
- [25] ASTM, ASTM C162. Terminology of Glass and Glass Products, (2005). <https://doi.org/10.1520/C0162-05>.
- [26] T. López, A. Martínez, El mundo mágico del vidrio., 1st ed., Fondo de Cultura Económica, México, 2003. <https://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/mundoma.html> (accessed February 2, 2026).
- [27] D.A. Rodríguez Carvajal, Fabricación y Caracterización de Vidrios del Sistema Na<sub>2</sub>O-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub>, Maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 2013.

<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/625/1/Tesis%20David%20Alejandro%20Rodríguez%20Carvajal.pdf> (accessed July 1, 2025).

- [28] 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>.
- [29] 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>.
- [30] Inmovilización de Resinas Iónicas de grado Nuclear en Materiales activados Alcalinamente (IRINEMA), *ACTIVACIÓN ALCALINA*, (2019). <https://irinema.ietcc.csic.es/index.php/activacion-alkalina-2/> (accessed August 25, 2024).
- [31] 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>.
- [32] 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>.
- [33] 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>.

- [34] 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>.
- [35] 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>.
- [36] 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>.
- [37] 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>.
- [38] 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>.
- [39] 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](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/133970/Memòria_TsotsisGeorgios.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (accessed May 20, 2024).

- [40] 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>.
- [41] 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>.
- [42] A.A. Ramezaniapour, 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>.
- [43] 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>.
- [44] 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>.

- [45] 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>.
- [46] 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>.
- [47] 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>.
- [48] 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>.
- [49] 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/>.
- [50] 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>.

- [51] 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>.
- [52] 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).
- [53] M. Frías, A. Alujas, A. Moreno-Reyes, J.A. Ibañez, M.V. Paredes, I. Vegas, Advances in understanding R3 chemical reactivity in various traditional and emerging pozzolans: Chemical, mineralogical and calorimetric dimensions, *Constr. Build. Mater.* 457 (2024) 139474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139474>.
- [54] 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](http://www.astm.org).
- [55] ASTM, ASTM C109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, (n.d.). [https://www.astm.org/c0109\\_c0109m-20.html](https://www.astm.org/c0109_c0109m-20.html) (accessed August 27, 2024).
- [56] 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).

- [57] 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](http://www.astm.org),.
- [58] ASTM, ASTM C150:Standard Specification for Portland Cement, 2012. [www.astm.org](http://www.astm.org),.
- [59] D. Kriptavičius, G. Girskas, G. Skripkiūnas, Use of Natural Zeolite and Glass Powder Mixture as Partial Replacement of Portland Cement: The Effect on Hydration, Properties and Porosity, *Materials* 15 (2022).  
<https://doi.org/10.3390/ma15124219>.
- [60] 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>.
- [61] J.M. Ortega, V. Letelier, M. Miró, G. Moriconi, M. Ángel Climent, I. Sánchez, Influence of waste glass powder addition on the pore structure and service properties of cement mortars, *Sustainability (Switzerland)* 10 (2018).  
<https://doi.org/10.3390/su10030842>.
- [62] 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>.
- [63] L. Hupa, Melt-derived bioactive glasses, in: *Bioactive Glasses*, Elsevier, 2011: pp. 3–28. <https://doi.org/10.1533/9780857093318.1.3>.

- [64] T. Van Acker, S. Theiner, E. Bolea-Fernandez, F. Vanhaecke, G. Koellensperger, Inductively coupled plasma mass spectrometry, *Nature Reviews Methods Primers* 3 (2023) 52. <https://doi.org/10.1038/s43586-023-00235-w>.
- [65] 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>.
- [66] G. Barraza-Garza, L.A. de la Rosa, A. Martínez-Martínez, Hi. Castillo-Michel, M. Cotte, E. Alvarez-Parrilla, La microespectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIRM) en el estudio de sistemas biológicos, *Rev. Latinoam. Quim.* 41 (2013) 125–148. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-59432013000300001#:~:text=Los%20movimientos%20simétricos%20se%20caracterizan%20porque%20los,et%20al.,%202005%3B%20Miller%20%26%20Dumas,%202010](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-59432013000300001#:~:text=Los%20movimientos%20simétricos%20se%20caracterizan%20porque%20los,et%20al.,%202005%3B%20Miller%20%26%20Dumas,%202010).)). (accessed February 7, 2026).
- [67] A. Rincón, D. Desideri, E. Bernardo, Functional glass-ceramic foams from ‘inorganic gel casting’ and sintering of glass/slag mixtures, *J. Clean. Prod.* 187 (2018) 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.065>.
- [68] 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>.

- [69] 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>.
- [70] ASTM, ASTM C1897 - Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements, (2020). <https://doi.org/10.1520/C1897-20>.
- [71] P. Suraneni, Recent developments in reactivity testing of supplementary cementitious materials, *RILEM Technical Letters* 6 (2021) 131–139. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.150>.
- [72] D. Siang Ng, S.C. Paul, V. Anggraini, S.Y. Kong, T.S. Qureshi, C.R. Rodriguez, Q. feng Liu, B. Šavija, Influence of SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the properties of fly ash blended cement mortars, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119627>.
- [73] L. Frølich, L. Wadsö, P. Sandberg, Using isothermal calorimetry to predict one day mortar strengths, *Cem. Concr. Res.* 88 (2016) 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.06.009>.
- [74] X. Chang, X. Yang, W. Zhou, G. Xie, S. Liu, Influence of Glass Powder on Hydration Kinetics of Composite Cementitious Materials, *Advances in Materials Science and Engineering* 2015 (2015) 1–7. <https://doi.org/10.1155/2015/713415>.
- [75] M. Mejdí, W. Wilson, M. Saillio, T. Chaussadent, L. Divet, A. Tagnit-Hamou, Hydration and microstructure of glass powder cement pastes – A multi-technique

investigation, *Cem. Concr. Res.* 151 (2022) 106610.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106610>.

- [76] 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>.
- [77] X. Zhang, H. Zhao, Z. Tao, W. Li, Performance of sustainable cementitious mortar incorporating hybrid waste glass powder and steel slag, *Constr. Build. Mater.* 472 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140928>.
- [78] S. Qaidi, H.M. Najm, S.M. Abed, Y.O. Özkılıç, H. Al Dughaishi, M. Alost, 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>.
- [79] Y. Zhao, B. Meng, X. Yin, Q. Li, Study on mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete containing waste glass powder, *AIP Adv.* 15 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0275227>.
- [80] Y. Himath Kumar, G.J. Swaroop, P. Sai Krishna, D.B. Thapa, N.N. Kumar, The Impact of Glass Powder on Concrete's Mechanical Properties: A Sustainable Approach, n.d. [www.bpasjournals.com](http://www.bpasjournals.com).
- [81] Q. Li, X. Shi, Y. Hu, C. Kang, X. Zhao, Establishment of hydration kinetics model and micro-mechanism analysis of waste glass powder-cement composite cementitious material under physical activation, *Journal of Building Engineering* 114 (2025) 114306. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114306>.

- [82] M.T. Tognonvi, A. Tagnit-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>.
- [83] E. John, B. Lothenbach, Cement hydration mechanisms through time – a review, *J. Mater. Sci.* 58 (2023) 9805–9833. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08651-9>.
- [84] 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>.
- [85] S. Li, Y. Sakai, Rapid visualization and quantification of water penetration into cement paste using near-infrared hyperspectral imaging, *Cem. Concr. Compos.* 161 (2025) 106103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106103>.
- [86] A. Khmiri, M. Chaabouni, B. Samet, Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>.
- [87] 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>.
- [88] 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>.
- [89] P. Shoaee, F. Ameri, H. Reza Musaei, T. Ghasemi, C.B. Cheah, Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A

comprehensive comparative study, *Constr. Build. Mater.* 251 (2020) 118991.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118991>.

- [90] H.U. Ahmed, S.A. Ahmad, B.H.S. Hamah Ali, S.N. Hussein, S.K. Rafiq, Investigation of the fresh, mechanical, durability, and microstructural properties of waste glass powder-modified cement paste, *Discover Concrete and Cement* 1 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00018-4>.
- [91] G. Vijayakumar, G., V.H., & G.D. (2013). S. on G.P. as P.R. of C. in C.Production. Vijayakumar, G., V.H., & G.D. (2013). S. on G.P. as P.R. of C. in C.Production. Vijayakumar, *Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production, Engineering, Environmental Science, Materials Science* (2013). <https://www.semanticscholar.org/paper/Studies-on-Glass-Powder-as-Partial-Replacement-of-Vijayakumar-Vishaliny/e9e5846be36aa3c3b76f428b848492f25ba89b2b#cited-papers> (accessed February 11, 2026).
- [92] N. Tamanna, R. Tuladhar, Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete, *The Open Waste Management Journal* 13 (2020) 1–13. <https://doi.org/10.2174/1874347102013010001>.
- [93] S.K. Adhikary, Ž. Rudžionis, R. Rajapriya, The Effect of Carbon Nanotubes on the Flowability, Mechanical, Microstructural and Durability Properties of Cementitious Composite: An Overview, *Sustainability* 12 (2020) 8362. <https://doi.org/10.3390/su12208362>.

- [94] 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>.
- [95] C. Freitas, R.H. Mü, Effect of light and temperature on zeta potential and physical stability in solid lipid nanoparticle (SLN<sup>TM</sup>) dispersions, 1998.
- [96] J. Björnström, A. Martinelli, A. Matic, L. Börjesson, I. Panas, Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement, Chem. Phys. Lett. 392 (2004) 242–248.  
<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.05.071>.
- [97] M.S. Konsta-Gdoutos, Z.S. Metaxa, S.P. Shah, Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials, Cem. Concr. Res. 40 (2010) 1052–1059.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.015>.
- [98] Y. Gökşen, U. Durak, S. İlkentapar, İ.İ. Atabey, M. Kaya, O. Karahan, C.D. Atiş, Synergistic effect of waste glass powder and fly ash on some properties of mortar and notably suppressing alkali-silica reaction, Revista de La Construcción 22 (2023) 419–430. <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.2.419>.
- [99] Q. Yang, Q. Yang, X. Peng, K. Xia, B. Xu, A Review of the Effects of Nanomaterials on the Properties of Concrete, Buildings 15 (2025).  
<https://doi.org/10.3390/buildings15132363>.