

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Mérida

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

**“Polvo de vidrio reciclado como reemplazo parcial de
cemento en concretos, con acero de refuerzo, expuestos a
la brisa marina y como precursor en pastas de cementos
activados por álcalis”**

TESIS

Que presenta

Edwin Rene Hoil Canul

Para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

en

Fisicoquímica

Directores de Tesis:

Dr. Luis Alfonso Maldonado López

Dr. José Iván Escalante García

Mérida, Yucatán, México

abril de 2024

Agradecimientos.

- Al CONAHCYT por la beca otorgada para realizar el posgrado.
- Al CINVESTAV - Unidad Mérida por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.
- Al Dr. Luis Maldonado López, por su acompañamiento, mentoría y amistad otorgada durante este tiempo.
- Al Dr. Iván Escalante García, por recibirme en su laboratorio durante la estancia de investigación y permitirme seguir trabajando a pesar de la contingencia.
- Al Dr. Geonel Rodríguez Gattorno por su apoyo desde la maestría.
- A los Profesores Dr. Román castro Rodríguez y Dra. María Antonieta Fernández Herrera, por su apoyo, como coordinadores académicos, durante el proceso de obtención del grado.
- A Zhirnay Rodríguez Pinelo, por su apoyo en trámites académicos y disposición para resolver cualquier duda durante los procesos escolares.
- A Mariné Matey Farfán, por el apoyo brindado antes, durante y después de las comisiones.
- Al comité sinodal por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo.
- A mis compañeros y amigos de generación de Cinvestav Mérida.
- A los compañeros de Cinvestav Saltillo, en especial a Mary Loy.
- A los auxiliares Gualdemar Casanova Calam, Marbella Echeverría Montero, Mercedes Balancán Zapata y Oswaldo Gómez Ortiz por su apoyo en los muestreos en campo y en los análisis de muestras en laboratorio.
- A los auxiliares Daniel Aguilar Treviño, y Víctor Rejón Moo, por el apoyo en los análisis, en los respectivos laboratorios del en el laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav-IPN; financiado por los proyectos FOMIX-Yucatán 2008-108160, CONACYT LAB-2009-01-123913, 292692, 294643, 188345 Y 204822.
- Un especial agradecimiento a toda mi Familia y amigos.

Índice de contenido

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos.....	3
Capítulo 1. Antecedentes.....	4
1.1 Cemento Pórtland.	4
1.2 Vidrio.....	5
1.3 Vidrio reciclado en la industria de la construcción.	5
Capítulo 2. Marco Teórico.....	7
2.1 Cemento Portland.	7
2.2 Química del cemento.	9
2.3 Vidrio y sus clasificaciones.	10
2.4 Química del vidrio.	11
2.5 Demanda de energía en los procesos de producción de cemento y vidrio.	12
2.6 Pastas, morteros y concretos.....	14
2.7 Tipos de agregados.	15
2.8 Materiales cementosos suplementarios.	15
2.9 Residuos sólidos urbanos y reciclaje de vidrio.....	17
2.10 Uso del vidrio en la industria de la construcción.	20
2.11 Cementos activados por álcalis.....	22
2.12 Etapas de reacción en los cementos activados por álcalis.	24
2.13 Durabilidad de los concretos.	25
2.13.1 Corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto.	25
2.13.2 Carbonatación.....	26
2.13.3 Corrosión del acero de refuerzo en ambiente marino.....	27
2.14 Técnicas electroquímicas para la evaluación de corrosión del acero de refuerzo.	30
2.14.1 Potencial de corrosión.	30
2.14.2 Resistencia a la polarización y densidad de corriente de corrosión.	31
Capítulo 3. Metodología.....	32
3.1 Acondicionamiento de materiales: caracterización de polvos y agregados.	32
3.1.1 Caracterización de polvos.....	32

3.1.2	Caracterización de agregados.	35
3.2	Preparación de muestras.	37
3.2.1	Concretos con acero de refuerzo embebido y sustitución parcial de cemento.....	37
3.2.2	Condiciones y características del sitio de exposición.....	39
3.3	Medición de carbonatación y concentración de cloruros en el concreto.....	41
3.4	Vidrio y caliza como precursores en cementos activados por álcalis.....	43
3.4.1	Diseño experimental y pastas preliminares.	43
3.4.2	Morteros a partir de pastas óptimas.....	45
3.4.3	Pastas con activadores en polvo.	47
Capítulo 4.	Resultados y discusión.....	49
4.1	Concretos con acero de refuerzo embebido.....	49
4.1.1	Resistencia mecánica a la compresión.....	49
4.1.2	Profundidad de carbonatación.	52
4.1.3	Concentración de cloruros.....	56
4.1.4	Potencial de corrosión.	59
4.1.5	Densidad de corriente de corrosión.	64
4.2	Vidrio y caliza como precursores en cementos activados por álcalis.....	68
4.2.1	Diseño experimental y pastas preliminares.	68
4.2.2	Pastas óptimas y morteros.	75
4.2.3	Pastas con activadores en polvo.	87
Conclusiones.....		90
Bibliografía.....		92

Índice de Figuras

Figura 2-1 Consumo de energía eléctrica y térmica durante la producción de cemento en diferentes países.....	12
Figura 2-2 Definición de umbral de cloruros basado en el modelo de Tutti.....	29
Figura 3-1 Proceso de recolección, trituración, molienda y cribado de vidrio.....	32
Figura 3-2 a) distribución de tamaño de partícula y b) micrografía de partículas de vidrio a 1000X.....	33
Figura 3-3 a) distribución de tamaño de partícula de vidrio y caliza y b) micrografía de partículas de caliza a 1000X.....	34
Figura 3-4 Patrones de DRX de cemento Portland, caliza y vidrio.....	35
Figura 3-5 Curvas granulométricas de a) arena caliza de Yucatán b) arena caliza de Coahuila.....	36
Figura 3-6 Esquema de la configuración de los electrodos utilizados en muestras de concreto.....	38
Figura 3-7 Ubicación del sitio de exposición.....	39
Figura 3-8 Tasa de depósito de iones cloruro (agosto 2014 a junio 2019) medidos en el sitio de exposición.....	40
Figura 3-9 Tasa de depósito de dióxido de azufre medidos en el sitio de exposición.....	41
Figura 3-10 Esquema de rodajas y perforaciones requeridas para la medición de concentración de cloruros.....	42
Figura 3-11 Distribución espacial del diseño experimental.....	43
Figura 3-12 Preparación de pastas.....	45
Figura 4-1 Desarrollo de resistencia mecánica a la compresión de concretos con sustitución parcial de vidrio.....	50
Figura 4-2 Desarrollo de la profundidad de carbonatación en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.....	55
Figura 4-3 Concentración de cloruros en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.....	58
Figura 4-4 Potenciales de corrosión en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.....	61

Figura 4-5 Densidades de corriente de corrosión en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.....	67
Figura 4-6 Resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares curadas en seco y bajo agua a 7, 14 y 28 días.....	69
Figura 4-7 Comparación del efecto de M_s y $\%Na_2O$ sobre la resistencia mecánica a la compresión a 28 días.	71
Figura 4-8 Efecto de los factores sobre la resistencia mecánica a la compresión a 28 días de curado en a) seco y b) bajo agua.	72
Figura 4-9 Resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares curadas en seco y bajo agua a 90, 120 y 180 días.....	73
Figura 4-10 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, a 28 días de curado en seco a 40°C (a) y 20°C (b).....	76
Figura 4-11 Microestructuras (1000X) de pastas óptimas a 28 días de curado en seco a 40°C.....	78
Figura 4-12 Evolución de fases a 1, 28 y 90 días de curado en seco.	79
Figura 4-13 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas a 90 y 120 días de curado en seco a 40°C.	80
Figura 4-14 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas a 90 días de curado en seco a 20°C.....	81
Figura 4-15 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas a 7, 14 y 28 días de curado bajo agua: a) 40°C y b) 20°C.....	82
Figura 4-16 Resistencia mecánica a la compresión de morteros a 28, 90 y 120 días de curado en seco a 40°C.	85
Figura 4-17 Resistencias mecánicas a la compresión de morteros, a 7, 14, 28 y 90 días de curado bajo agua a 40°C.....	86
Figura 4-18 Resistencias mecánicas a la compresión de pastas con activador en polvo, desarrolladas desde 1 y hasta 120 días de curado a diferentes temperaturas.	87
Figura 4-19 Resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo, desarrolladas desde 7 y hasta 90 días de curado bajo agua.	88

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Composición química del cemento Portland ordinario y del CPC-30R.	7
Tabla 2-2 Clasificación del cemento Portland.....	8
Tabla 2-3 Tipos de vidrios y sus principales aplicaciones.	10
Tabla 2-4 Rangos de composición química del vidrio tipo SiO ₂ - Na ₂ O -CaO.	11
Tabla 2-5 Consumo energético del sector industrial en México en 2017.	13
Tabla 2-6 Tipos de activación de materiales suplementarios.	16
Tabla 2-7 Materiales cementantes suplementarios comunes.....	17
Tabla 2-8 Composición y reciclaje de los residuos sólidos generados en México.....	18
Tabla 2-9 Contenedores de vidrio desechados y reutilizados o reciclados a nivel global.	19
Tabla 2-10 Categorías de cementos alcalinamente activados.	23
Tabla 2-11 Umbrales de cloruros reportados en la literatura.	28
Tabla 3-1 Caracterización de vidrio y caliza pulverizados.....	34
Tabla 3-2 Sistemas de muestras, tipo de agregado y su caracterización.	35
Tabla 3-3 Materiales utilizados en las mezclas de concretos.	37
Tabla 3-4 Variables y niveles experimentales considerados.	43
Tabla 3-5 Formulaciones de los tratamientos.	44
Tabla 3-6 Formulaciones óptimas de pastas y condiciones de curado.	46
Tabla 3-7 Formulaciones utilizadas en morteros (1:2.5).....	47
Tabla 3-8 Formulaciones con activadores en polvo.	48
Tabla 4-1 Índice de actividad (%) de los concretos con contenido de vidrio.....	52
Tabla 4-2 Profundidades de carbonatación a 48 meses de exposición.....	54
Tabla 4-3 Concentraciones de cloruros con respecto al tiempo en el cual los potenciales ingresaron a la región de actividad de corrosión incierta (<-140mV).....	63
Tabla 4-4 Valores de densidades de corriente de corrosión y tiempos en los que se pierde condición pasiva en el acero de refuerzo ($\geq 0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$).	66
Tabla 4-5 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares, curadas en seco a 40°C.	70
Tabla 4-6 Modelos generados a partir del análisis de varianza.....	71

Tabla 4-7 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares, curadas bajo agua a 40°C.....	74
Tabla 4-8 Formulaciones óptimas de pastas.....	75
Tabla 4-9 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas en seco a 40°C.....	76
Tabla 4-10 Valores esperados de resistencia mecánica a la compresión de pastas curadas en seco y bajo agua a 28 días	77
Tabla 4-11 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas en seco a 20°C.....	81
Tabla 4-12 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas bajo agua a 40°C.....	83
Tabla 4-13 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas,curadas bajo agua a 20°C.....	84
Tabla 4-14 Resistencia mecánica a la compresión de morteros, curados en seco a 40°C.	85
Tabla 4-15 Resistencia mecánica a la compresión de morteros,curados bajo agua a 40°C...	86
Tabla 4-16 Resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo,curadas en seco a diferentes regímenes de temperaturas.....	88
Tabla 4-17 Resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo,curadas bajo agua desde 7 y hasta 90 días.....	89
Tabla 4-18 Comparación de resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo y con solución activadora a 28, 90 y 120 días de curado... ..	89

Resumen.

En este trabajo se presentan los resultados del desempeño de concretos con relaciones a/c de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70, con sustitución parcial de 0%, 5%, 10% y 15% (% en peso) de cemento CPC-30R por vidrio pulverizado con finura de 455-457 m²/kg. Se realizaron ensayos de resistencia mecánica a la compresión a 28, 90, 270, 360 y 540 días de curado en inmersión en agua saturada con Ca(OH)₂. Los concretos con y sin acero de refuerzo embebido se expusieron a un ambiente marino en la costa norte de Yucatán. En concretos sin acero con hasta 48 meses de exposición, se midieron profundidad de carbonatación y concentración de cloruros. Para este último periodo, en el acero embebido, se midieron potencial de corrosión y resistencia a la polarización lineal, a partir de la cual se calculó la densidad de corriente de corrosión. En todos los concretos, la resistencia mecánica a la compresión aumentó en promedio alrededor de 7 MPa desde 28 y hasta 540 días de curado.

A 48 meses de exposición, los concretos con 15% de vidrio y con relaciones a/c de 0.40 y 0.50, presentaron bajas profundidades de carbonatación (7.5 mm y 6.5 mm, respectivamente) y bajas concentraciones de cloruros (0.2 ppmc y 0.3 ppmc, respectivamente), mientras que las muestras de control (sin vidrio) con relaciones a/c de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70 presentaron altas concentraciones (0.9 ppmc, 2 ppmc, 2.7 ppmc y 3.4 ppmc, respectivamente). Con respecto al potencial de corrosión, para este mismo tiempo de exposición, los concretos con 10% y 15% de vidrio y con relación a/c de 0.50, presentaron valores más positivos que -140 mV; -99.5 mV y -83.4 mV (90% de probabilidad de nula actividad), lo que correspondió con las densidades de corriente de corrosión obtenidas: 0.12 μA/cm² (de baja a moderada corrosión) y 0.05 μA/cm² (condición pasiva), respectivamente.

Por otro lado, se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión de pastas y morteros obtenidos a partir de activación por álcalis, utilizando precursores de polvos de vidrio (607-626 m²/kg) y caliza (642-694 m²/kg) y una solución activadora compuesta por Na₂•SiO₃ (líquido), NaOH y bajas proporciones de cemento CPC-30R. Los medios de curado fueron en seco y bajo agua. Las temperaturas variaron entre 20°C, 40°C y 80°C (según el diseño experimental). Las pastas con 100% de vidrio alcanzaron 99.4 MPa a los 28 días de curado a 40°C, en seco. Para la misma temperatura de curado, pero bajo agua, las muestras alcanzaron 29.8 MPa. Las pastas con altas resistencias mecánicas fueron caracterizadas por

difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

Los datos presentados mostraron que el polvo de vidrio, en bajas proporciones de sustitución, puede ayudar a retrasar la corrosión del acero de refuerzo embebido en concretos expuestos en ambiente marino. Por otro lado, la resistencia mecánica a la compresión aumenta principalmente cuando el vidrio es activado por álcalis.

Abstract.

This study shows the results about the development of concretes with water to cement ratio of 0.40, 0.50, 0.60 and 0.70 using powder glass as partial cement replacement by 0%, 5%, 10% and 15% (% weight percent). The powder fineness was of 455-457 m²/kg. Mechanical strength was tested at 28, 90, 270, 360 y 540 days of curing under water saturated with Ca(OH)₂. Concretes with and without rebars were exposed to tropical marine environment in the northern coast of Yucatán. In samples without rebars, the carbonation depth and chloride concentration were measured until after 48 months. For this last period, the corrosion potential and linear polarisation resistance were measured during in the rebars; data was used to calculate the corrosion current density. For all concretes the strength increased 7 MPa in average from 28 to 540 days. At 48 months the concretes with 15% of glass and water to cement ratio of 0.40 and 0.50, showed low values of carbonation depth (7.5 mm y 6.5 mm, respectively) and chloride concentrations (0.2 ppmc and 0.3 ppmc, respectively). The samples without glass for all w/c ratios presented high concentrations (0.9 ppmc, 2 ppmc, 2.7 ppmc, and 3.4 ppmc, respectively). The corrosion potential, at 48 months, in the concretes with 10% and 15% of glass and water to cement ratio of 0.50, showed more positive values than -140 mv; 99.5 mV and -83.4 mV (90 % probability that no reinforcing steel corrosion is occurring). These values corresponded to corrosion current density of 0.12 μA/cm² (low to moderate corrosion) y 0.05 μA/cm² (passive condition), respectively.

On the other hand, pastes and mortars were studied, based on alkaline cements using powdered precursors of glass (607-626 m²/kg) and limestone (642-694 m²/kg) powders, activated with a mix of Na₂•SiO₃ (liquid), NaOH and low cement proportions. The specimens were cured in dry and under water conditions. The temperatures varied between 20°C, 40°C y 80°C (according to experimental design). Pastes with high glass content (100%) and temperatures developed highest strength values at 28 days in dry (99.4 MPa) and underwater (29.8 MPa) condition, at 40°C. The pastes with higher values were characterized using X-ray diffraction and scanning electron microscope.

The data presented showed that glass powder, in low substitution proportions, can help delay the corrosion of rebar in concrete exposed in a marine environment. The mechanical strength increases mainly when de glass powder is used as precursor in alkaline cements.

Introducción.

La producción de cemento tipo Portland emite altas emisiones de CO₂ debido a la gran demanda de energía para operar los hornos a 1450°C mediante el uso de combustibles fósiles, adicionalmente, por la descarbonatación de la materia prima (CaCO₃). A nivel global, el consumo de cemento aumenta 1% cada año y tiene relación directa con el crecimiento poblacional. Además, el uso sostenible de los recursos naturales es un factor importante en las actividades que involucren su explotación. La industria del cemento y de la construcción no son la excepción. En los últimos años se han investigado y evaluado diversos materiales cementosos suplementarios y/o alternativos, para reemplazar de forma parcial o total el cemento Portland en morteros y concretos. Entre estos materiales se encuentran: arcillas calcinadas, subproductos industriales (escorias y cenizas), residuos sólidos urbanos (materiales cerámicos, desechos de construcción y desechos de vidrio) o cenizas de subproductos agrícolas (cenizas de caña, cáscara de arroz y olote).

Los residuos de vidrio, principalmente contenedores de vidrio tipo SiO₂-Na₂O-CaO, representan un problema en zonas urbanas, ya que es un material no degradable que ocupa grandes volúmenes en los vertederos o rellenos sanitarios. Por ejemplo, en México, son producidos anualmente alrededor de 2.6 millones de toneladas de contenedores de vidrio, de las cuales solo son recicladas el 12% [1]. Dado su alto contenido de sílice y amplia disponibilidad, los desechos de vidrio son considerados una fuente viable y sustentable de material cementoso suplementario para el cemento Portland. También puede ser utilizado como precursor en cementos activados por álcalis, donde ha demostrado que puede llegar a desarrollar altas resistencias mecánicas a la compresión a 28 días de curado en seco y también bajo agua, a diferentes temperaturas. Es necesario que los cementos alternativos en morteros y concretos tengan prestaciones mecánicas y de durabilidad similares o superiores que los tradicionales, aún en ambientes agresivos con altos contenidos de contaminantes como SO₂, CO₂ o iones cloruro. Estos contaminantes pueden catalizar el proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto, formando capas de óxidos e hidróxidos de hierro que, al expandirse, pueden generar grietas en el concreto, lo que disminuye su durabilidad.

En este trabajo se propone el uso de polvo de vidrio como reemplazo parcial de cemento en concretos con acero de refuerzo embebido, en proporciones en peso de 0%, 5%, 10% y 15%. Los concretos fueron expuestos a ambiente marino tropical por hasta 48 meses, en donde la tasa de depósito promedio de cloruros es de $130.5 \text{ mgCl}^-/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ y las tasas de corrosión se encuentran entre $200 \text{ }\mu\text{m/año}$ a $700 \text{ }\mu\text{m/año}$, para aceros sin recubrimiento. El desempeño de los concretos con contenido de vidrio se evaluó considerando el potencial de corrosión, la densidad de corriente de corrosión, profundidad de carbonatación y penetración de cloruros.

También se propone el uso de polvos de vidrio (V) y de caliza (C) como precursores (% en peso) para la preparación de cemento activado por álcalis. Para ellos, se prepararon pastas y morteros con contenidos de: 100%V:0%C, 85%V:15%C, 70%V:30%C, 55%V:45%C y 40%V:60%C. Incluso, en algunas pastas se consideró hasta 25% de cemento. El desarrollo de resistencia mecánica a la compresión fue medido a diferentes edades de curado en seco. También se evaluó el desarrollo de carácter hidráulico en muestras curadas bajo agua.

Objetivos generales.

Determinar la viabilidad de uso de desechos de vidrio en dos rutas: a) para reemplazar parcial o totalmente el cemento Pórtland en pastas y concretos, preservando las propiedades mecánicas y de durabilidad y b) como precursor en combinación con caliza en cementos activados por álcalis.

Objetivos específicos.

- ✓ Utilizar polvo de vidrio, como reemplazo parcial de cemento Pórtland en proporciones de 0%, 5%, 10% y 15% (% en peso), en concretos con y sin acero de refuerzo embebido para evaluar su durabilidad con respecto a la corrosión del acero de refuerzo.
- ✓ Evaluar la resistencia mecánica a la compresión de concretos a diferentes edades de curado en inmersión para determinar el efecto del vidrio en el desarrollo de esta propiedad mecánica.
- ✓ Exponer muestras de concretos base cemento Pórtland con y sin vidrio a un ambiente marino tropical para analizar concentración de cloruros y carbonatación.
- ✓ Medir potencial de corrosión y resistencia a la polarización lineal del acero de refuerzo embebido, a diferentes tiempos de exposición para evaluar su grado de corrosión.
- ✓ Analizar la viabilidad del uso de vidrio y caliza pulverizados, como precursores en cementos activados por álcalis.
- ✓ Caracterizar el desarrollo de resistencia mecánica a la compresión de pastas y morteros, curados en seco y bajo agua (para analizar su carácter hidráulico) a diferentes regímenes de temperatura (20°C, 40°C y 80°C).
- ✓ Caracterizar las microestructuras de pastas de cementos alcalinos por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Difracción de Rayos X (DRX), para correlacionarla con las propiedades mecánicas.

Capítulo 1. Antecedentes.

1.1 Cemento Pórtland.

El cemento Portland fue patentado en el año 1824 por Joseph Aspdin en Inglaterra. Durante esta época los principales materiales empleados en la construcción eran la ceniza volcánica, yeso y cal, los cuales fueron sustituidos por el cemento debido a que ofrecía mayores ventajas con respecto a su carácter hidráulico. A finales de 1800, el material fue integrándose en los procesos constructivos que utilizaban morteros y concretos (con y sin acero de refuerzo) que eran utilizados en construcciones urbanas e industriales [2].

La producción de cemento en México data del año 1905 cuando la primera planta productora inicio operaciones en el estado de Nuevo León. El siguiente año fue inaugurada una segunda planta y para el año 1931, estas dos empresas se fusionaron para formar “Cementos mexicanos” [3]. En las primeras etapas de las empresas fundadoras (1910), el cemento producido fue utilizado en la construcción de las nuevas instalaciones portuarias en Veracruz y Tampico: bases y puentes de ferrocarriles, pavimentación de calles, sistemas de drenaje, entre otros. Solamente pequeñas cantidades fueron utilizadas en construcciones públicas y en edificación de casas particulares [4]. Durante el período 1911-1920 la producción y consumo de cemento disminuyó como resultado de la inestabilidad socioeconómica del país a causa de la revolución mexicana. Al finalizar este período, el país entró a una etapa de reconstrucción (1920-1940) que fue de gran beneficio para la industria, ya que el concreto comenzó a dominar como material de construcción. El aumento de la población y su migración del medio rural al urbano representó un aumento en el desarrollo de viviendas unifamiliares, complejos departamentales, edificios gubernamentales, mercados, estadios, hospitales, escuelas entre otras edificaciones, principalmente en la ciudad de México [5].

1.2 Vidrio.

El vidrio ha sido utilizado en distintas culturas y se han encontrado evidencias de vidrio manufacturado en tumbas egipcias que datan del año 3500 a.c. [5] así como en territorios que ocupó Mesopotamia en el 3000 a.c [6]. También se encontró un manual para elaborar vidrio perteneciente a la cultura Asiria (650 a.c.). Para el año 200 d.c. los romanos ya producían botellas de diferentes formas y tamaños. En el siglo XVII se utilizaba el vidrio en instrumentos ópticos como telescopios y microscopios. Hacia el siglo XIX, en Europa los procesos de producción de vidrio dejaron de ser artesanales para dar paso a procesos semiautomatizados. Después de la segunda guerra mundial, los procesos de producción de vidrio plano y de botellas fueron perfeccionados e insertados en la industria [6].

1.3 Vidrio reciclado en la industria de la construcción.

Muchos subproductos industriales son utilizados como material cementoso suplementario; estos incluyen: ceniza volante, humo de sílice y escoria de alto horno. Sin embargo, en las regiones no industrializadas del mundo, como es el caso de la península de Yucatán, se tiene poca accesibilidad a ellos. Esto da lugar a probar otras fuentes de materiales, como son los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), los cuales pueden ser reciclados y reutilizados. Un subproducto de los RSU es el vidrio, el cual puede ser empleado como agregado fino o grueso, o como cementante cuando está finamente molido; también se usa como agregado en asfalto, baldosas, bloques de construcción, bloques para pavimentos, aceras, etc. [7,8]. El vidrio tipo sílice-soda-cal reciclado es una alternativa viable como material suplementario de cemento, debido a su alto contenido de SiO_2 (alrededor del 70%) y a su estructura amorfa, la cual puede ser disuelta en un medio alcalino y reaccionar con hidróxido de calcio para formar silicato de calcio hidratado [9]. Un factor importante para la reutilización del vidrio es la finura, que se relaciona directamente con su reactividad puzolánica [10]. Generalmente se utiliza la molienda como un medio para reducir el tamaño y obtener alta finura; esto constituye una forma de activación mecánica. La reducción del contenido de cemento en los concretos, sustituyéndolo con subproductos o desechos tiene como objetivos la reducción de consumo de energía y CO_2 [11,12].

Se ha reportado que la utilización de polvo de vidrio en concretos favorece las propiedades mecánicas de compresión, tensión y flexión a edades avanzadas. También se mejoran características como permeabilidad y resistencia a la penetración de iones cloruro, debido a que los poros internos son llenados por partículas de vidrio, lo que reduce el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo embebido [13].

Por otro lado, la producción de cementos activados por álcalis también es una opción para la reutilización de materiales de desecho. Estos cementos alternativos aplicados en pastas, morteros y concretos desarrollan altas resistencias mecánicas a la compresión [14]. Los primeros estudios de estos materiales se remontan al año de 1908-1930 en China y en la ex Unión Soviética [15]. Estos cementos utilizan precursores en polvo en sistemas silicoaluminosos ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) con bajos o altos contenidos de CaO y como activador, compuestos alcalinos que puedan incrementar el pH a valores mayores que 11. En Ucrania se han construido edificios, ductos, drenajes, canales de riego, tramos de carreteras, bloques y losas prefabricadas; mientras que en Hong Kong se han desarrollado concretos autocompactantes, morteros arquitectónicos y bloques [14].

Capítulo 2. Marco Teórico.

2.1 Cemento Portland.

El cemento Portland ordinario, también llamado cemento hidráulico, cemento gris o de manera general cemento, se define como un material que fragua y endurece al reaccionar químicamente con el agua [16]. De manera general, el componente principal del cemento es clinker pulverizado, el cual es obtenido calcinando en horno operado a 1,450°C mediante combustibles fósiles; la materia prima es 80% de caliza y el resto arcillas, sílice y/o minerales que aporten Fe. De lo anterior se emite una tonelada de CO₂ por cada tonelada de cemento producido [17,18]. La producción de este material representa el 7% de las emisiones globales y se estima que en el año 2030 aumentarán a más del 50% [19]. En la Tabla 2-1 se presentan composiciones típicas de cemento Portland; se incluye la composición del Cemento Portland Compuesto (CPC-30R) utilizado en este trabajo y caracterizado por [19] por fluorescencia de rayos X.

Tabla 2-1 Composición química del cemento Portland ordinario y del CPC-30R [19-20].

Composición química	CPO % en peso¹	CPC-30R % en peso²
SiO ₂	19.8-22	24.07
Al ₂ O ₃	4.60-5.6	5.81
Fe ₂ O ₃	2.5-3.40	2.13
CaO	61.78-67	59.68
MgO	1.3-3.29	0.09
SO ₃	2.10-3.63	6.29
Na ₂ O	0.10-0.31	-----
K ₂ O	0.44-0.70	0.83
P ₂ O ₅	-----	0.46

El cemento Portland es clasificado con base en normas internacionales o específicas de cada país, por ejemplo, en Estados Unidos de América, las normas emitidas por la Sociedad Americana para pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y por el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés). En España, son las normas emitidas por la Asociación Española de Normalización (UNE) y en México, son las normas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNNCE). En la Tabla 2-2 se presenta la clasificación del cemento Portland con respecto a las normas ASTM y Norma Mexicana.

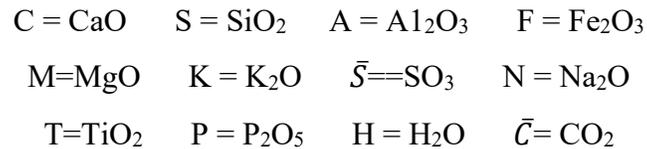
Tabla 2-2 Clasificación del cemento Portland [21,22].

Norma ASTM C150/C150M-22	NMX-C-414-ONNCCE-2017
Tipo I: Uso general, que no requiera propiedades especiales o específicas.	Por su composición.
Tipo IA: Uso general, que requiera incorporación de aire (burbujas) por medio de aditivos.	Cemento Pórtland ordinario (CPO).
Tipo II: Uso general, que requiera una moderada resistencia a sulfatos.	Cemento Pórtland puzolánico (CPP).
Tipo IIA: Uso general que requiera una moderada resistencia a sulfatos e incorporación de aire por medio de aditivos.	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno (CPEG).
Tipo II (MH): Uso general, que requiera moderado calor de hidratación y moderada resistencia a sulfatos.	Cemento Pórtland Compuesto (CPC).
Tipo II (MH)A: Uso general, que requiera moderado calor de hidratación y moderada resistencia a sulfatos, además de incorporación de aire por medio de aditivos.	Cemento Pórtland con humo de sílice (CPS).
Tipo III: Uso general, donde se requiera alta resistencia mecánica a edades tempranas.	Cemento con escoria granulada de alto horno (CEG).
Tipo III A: Uso general, donde se requiera obtener alta resistencia mecánica a edades tempranas, además de incorporación de aire por medio de aditivos.	Por su resistencia mecánica a la compresión
Tipo IV: Uso en sistemas donde se requiera un bajo calor de hidratación.	Resistencia mínima de 20 MPa y máxima de 40 MPa a 28 días (CPO 20).
Tipo V: Uso en sistemas, donde se requiera alta resistencia a sulfatos.	Resistencia mínima de 30 MPa y máxima de 50 MPa a 28 días (CPO 30).
Norma ASTM C595/C595M-23	Resistencia inicial mínima de 20 MPa a 3 días y resistencia mínima de 30 MPa y máxima de 50 MPa a 28 días (CPO 30R).
Tipo IS: Cemento Pórtland con contenido de escoria de alto horno.	Resistencia mínima de 40 MPa a 28 días (CPO 40).
Tipo IP: Cemento Pórtland con contenido de materiales puzolánicos.	Resistencia inicial mínima de 30 MPa a 3 días y resistencia mínima de 40 MPa a 28 días (40R).
Tipo IL: Cemento Pórtland con contenido de caliza.	Por sus características especiales
Tipo IT: Cemento ternario mezclado.	Resistentes a sulfatos (CPOXXRS).
	Baja reactividad álcali-agregado (CPOXXBRA).
	Bajo calor de hidratación (CPOXXBCH).
	Blanco (CPOXXB).

La producción mundial de cemento reportada hasta el año 2020 fue de 4,200 millones de toneladas [23]. Para este mismo año la producción de China, India, Rusia y Japón fue de 22,489; 20, 850; 6,060 y 4,917 toneladas, respectivamente [24]. En México, durante el año 2021, la producción de cemento fue de aproximadamente 51 millones de toneladas (considerando gris + blanco + mortero), de las cuales 45 millones correspondieron a la producción de cemento gris [25].

2.2 Química del cemento.

En la literatura relacionada al cemento, se utilizan fórmulas abreviadas en mayúsculas de los principales óxidos [26]. Las abreviaturas mayormente utilizadas son:



Las fases principales del cemento Portland son [27]:

- 1.- Alita (silicato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_3S): Es la fase de mayor contenido (60% -70%), reacciona de manera rápida con el agua y tiene relación directa con el desarrollo de resistencia mecánica a 28 días.
- 2.- Belita (silicato dicálcico, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S): Constituye entre 15-30% del cemento. Reacciona lentamente con el agua (las reacciones comienzan a ser significantes después de 10 días) y contribuye al desarrollo de resistencia mecánica a largo plazo.
- 3.- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A): Constituye entre 5-10% del cemento. Reacciona rápido con el agua e influye en el endurecimiento. Esta característica a su vez es ajustada utilizando yeso como retardante.
- 4.- Ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF): El contenido corresponde entre 10-15% del cemento.

2.3 Vidrio y sus clasificaciones.

El vidrio resulta de la fusión de materiales inorgánicos que han sido enfriados de manera controlada, a una condición rígida sin cristalizar. Es un material típicamente duro, homogéneo, estable, inerte, amorfo, isotrópico, brillante y tiene una fractura característica de tipo concoidal. El color y la transparencia del vidrio pueden controlarse a través del contenido de óxidos [28,29]. En la Tabla 2-3 se presentan los tipos de vidrio más comunes, sus composiciones y sus principales aplicaciones.

Tabla 2-3 Tipos de vidrios y sus principales aplicaciones [30].

Tipos de vidrio	Composición (% en peso)	Aplicación
SiO ₂ - Na ₂ O -CaO	SiO ₂ (66%-75%) Na ₂ O (12%-16%) CaO (6%-12%) MgO (0.1%-4%)	Contenedores (botellas, frascos), vidrio plano (ventanas, cristales panorámicos), bulbos de lámparas, paneles solares, aislamiento acústico y térmico, vasos y platos.
Borosilicato	SiO ₂ (74%-81%) Na ₂ O (4%-7%) B ₂ O ₃ (11%-15%) Al ₂ O ₃ (1%-6%)	Recipientes para hornos, frascos utilizados en laboratorios químicos e industria farmacéutica
Con contenido de Pb	SiO ₂ (32%-63%) Na ₂ O (1%-8%) K ₂ O (2%-9%) PbO (22%-65%)	Pantallas de televisión, tubos para lámparas, partes electrónicas y ópticas.
Con contenido de Ba	SiO ₂ (36%-65%) B ₂ O ₃ (10%) Na ₂ O (7%) K ₂ O (9%) PbO (2%-41%) Al ₂ O ₃ (2%-4%) BaO (2%)	Pantallas de televisión, óptica,
Aluminosilicato	SiO ₂ (57%-64.5%) Al ₂ O ₃ (16%-24.5%) B ₂ O ₃ (4%-5%) MgO (7%-10.5%) CaO (8%-10%) BaO (6%)	Tubos de combustión, fibra de vidrio, substrato de resistores.

2.4 Química del vidrio.

La durabilidad del vidrio SiO_2 - Na_2O - CaO se relaciona directamente con su composición química y la estabilidad y distribución de sus enlaces. A nivel estructural este tipo de vidrio se compone de una red principal de enlaces covalentes Si-O, la cual es modificada por Na^+ y Ca^{2+} , los cuales forman enlaces iónicos. El bajo contenido de óxidos alcalinos genera una estructura compacta, la cual incrementa su durabilidad [31]. Por otro lado, la degradación de este material se ve influenciado por los defectos superficiales y las condiciones ambientales como humedad, temperatura, contaminantes agresivos, etc. La Tabla 2-4 presenta las composiciones químicas del vidrio tipo SiO_2 - Na_2O - CaO y sus principales colores.

Tabla 2-4 Rangos de composición química del vidrio tipo SiO_2 - Na_2O - CaO [19,32,33].

Composición química (% en peso)	Color			
	Verde	Café	Transparente	Mezcla de colores
SiO_2	71.2-72.4	72-72.2	68-72	68.7-70.4
Al_2O_3	1.5-1.6	1.4-2.2	1- 1.5	1-2
Fe_2O_3	0.3-0.32	0.22-0.26	0.06-0.07	0.9-1.41
CaO	10.8-11.2	10.4-11.6	10.9-14.5	12-12.9
MgO	0.5-1.6	.072-0.4	0.3-1.8	0.87-1.8
Na_2O	13-13.5	13.7-13.8	12.2-13.6	12.9-13.3
K_2O	0.3-0.6	0.160-.20	0.3-0.8	0.85-1
TiO_2	0.04-0.07	0.041-0.1	0.03-0.05	-----
Cr_2O_3	0.2	0.01	-----	-----
SO_3	0.07	0.10	0.2-0.4	0.1

2.5 Demanda de energía en los procesos de producción de cemento y vidrio.

A nivel global, la energía consumida cada año supera los 370 EJ (1 EJ= Exajoule = 1×10^{18} Joules), lo cual equivale a 170 millones de barriles de petróleo por día [34]. Esta energía es utilizada en actividades industriales, de transporte, residenciales, servicios y los relacionados con la agricultura [35]. La producción de cemento Pórtland requiere entre 3.0 y 6.5 GJ de energía térmica y entre 110 y 120 kWh de energía eléctrica, por cada tonelada de cemento producido [36]. En la Figura 2-1, se observan las cantidades de energía eléctrica y térmica requeridas para la producción de cemento en diferentes países; México ocupa el tercer lugar después de Canadá y Estados Unidos de América.

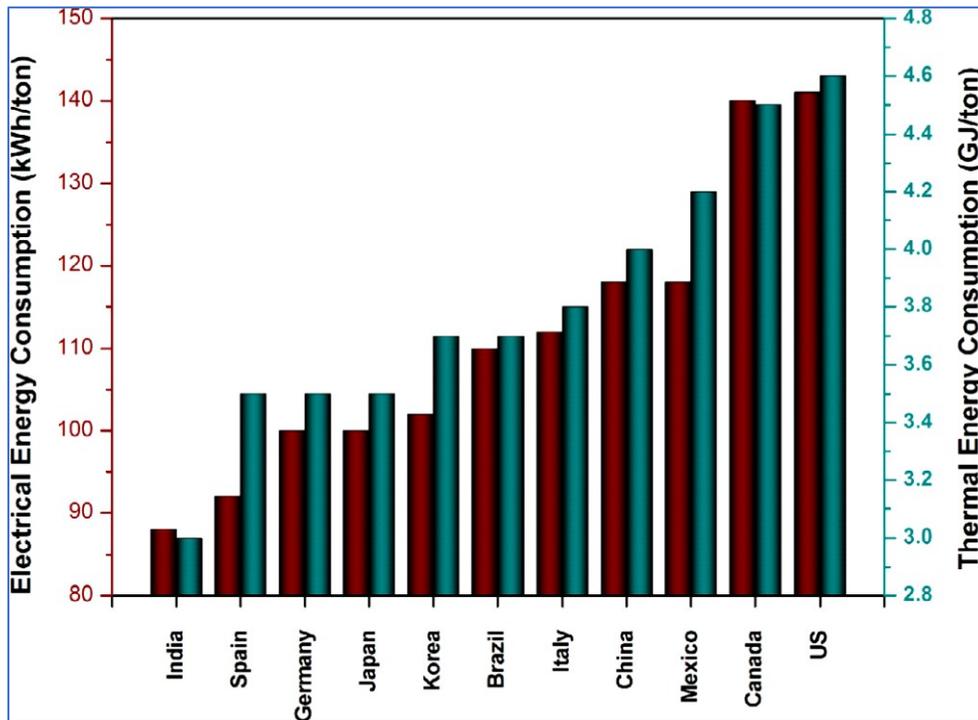


Figura 2-1 Consumo de energía eléctrica y térmica durante la producción de cemento en diferentes países [36].

El consumo de energía registrado en México en el año 2017 fue de 9.24 EJ, lo que corresponde a un aumento de 1.2% con respecto a 2016 y a un incremento de 1,000, 000, 000 GJ con respecto al año 2007. El sector del transporte representa un consumo del 44%, el sector industrial 35% y los sectores residencial, comercial y público, 17.6%. La Tabla 2-5 presenta el consumo energético (en Petajoules) de los principales sectores industriales del país reportados en el balance nacional de energía en el año 2017 [37]. La fabricación del cemento y productos similares consumieron 175.3 PJ y la fabricación de vidrio y sus productos, 51 PJ. En tanto que la industria del hierro y la industria de la construcción, consumieron 248 PJ y 13.2 PJ, respectivamente.

Tabla 2-5 Consumo energético del sector industrial en México en 2017 [37].

<i>Industria</i>	<i>Consumo (PJ**)</i>
Hierro y el acero	248
Fabricación de cemento y productos a base de cemento	175.3
Química	109.5
Minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas	71.3
Pemex Petroquímica	59
Fabricación de pulpa, papel y cartón	56.2
Fabricación de vidrio y productos de vidrio	51
Elaboración de azúcares	48.8
Elaboración de cerveza	24.3
Fabricación de automóviles y camiones	17.3
Construcción	13.2
Elaboración de refrescos, hielo y otras bebidas no alcohólicas, y purificación y embotellado de agua	11
Fabricación de productos de hule	10.4
Fabricación de fertilizantes	0.9
Elaboración de productos de tabaco	0.6
Otras ramas	979.6
**1 Petajoule = 1PJ = 1 x 10¹⁵ Joules	

2.6 Pastas, morteros y concretos.

Las pastas están constituidas por una mezcla de cemento y agua, mientras que los morteros están conformados por cemento y agregado fino en relaciones de 1:2.25 hasta 1:3.5, más agua. Los morteros son utilizados principalmente en trabajos de albañilería para unir unidades de mampostería en un sólo elemento estructural. El agua actúa como agente de mezclado y contribuye a la trabajabilidad e hidratación del cemento, por lo que debe estar libre de contaminantes y sustancias nocivas como aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica, etc.; la cantidad necesaria depende del material cementante y agregado fino. El cemento contribuye a la resistencia mecánica y durabilidad mientras que el agregado actúa como material de relleno inerte [38]. La resistencia mecánica a la compresión de los morteros aumenta directamente con el incremento de la cantidad de cemento y decrece con el aumento de cal, agua, arena y contenido de aire.

Por otra parte, el concreto es un material compuesto y heterogéneo, que consiste en un ligante y agregados finos y grueso. A diferencia del mortero, el concreto es un elemento estructural por sí mismo [38]. Los intersticios que existen entre los agregados gruesos son ocupados por la pasta de cemento y el agregado fino. Los poros capilares también son considerados parte de los concretos, ya que representan el volumen no ocupado o espacios vacíos internos por material cementante o productos de hidratación.

Un parámetro importante en las pastas, morteros y concretos es la relación agua/cemento, que se define como la relación entre la cantidad de agua, excluyendo aquella absorbida por los agregados y la cantidad de cemento utilizada. Se expresa en forma decimal y abreviada (a/c) y está directamente relacionada con la trabajabilidad de un mortero o concreto, es decir, con la facilidad y homogeneidad con que se puede mezclar, colocar y compactar [39]. Por otra parte, la demanda de cemento disminuye a medida que el tamaño del agregado aumenta.

A nivel global, se ha estimado que el consumo de concreto por persona al año es de 1 m^3 [40]. La producción de concretos depende de la disponibilidad de agregados y de grandes cantidades de agua; la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) indicó que las áreas con mayor estrés hídrico coinciden con las que presentan incremento en la producción de concreto [41].

2.7 Tipos de agregados.

El agregado es un material granular de origen natural o manufacturado, que se clasifica según el tamaño de partícula. Un agregado que retenido en un tamiz con abertura 4.75 mm (#4) es considerado agregado grueso; un agregado que pasa un tamiz de abertura 4.75 mm (#4), pero que es predominantemente retenido en un tamiz con abertura de 75 μm (#200), es denominado como agregado fino [42].

El origen y disponibilidad de los agregados utilizados en México varía regionalmente. Por ejemplo, en la península de Yucatán se utiliza roca caliza, la cual es sedimentaria de origen calcáreo y cuya composición es predominantemente de CaCO_3 (principalmente en forma de calcita y generalmente de color blanco). Esta roca es extraída del subsuelo y es triturada mecánicamente. Así mismo, en Coahuila, también es utilizada roca caliza, la cual tiene una coloración gris, debido a la profundidad de sedimentación, presencia de elementos traza o presencia de materia orgánica.

2.8 Materiales cementosos suplementarios.

Un material cementoso suplementario es un material inorgánico o mezcla de materiales inorgánicos que participan en las reacciones de hidratación en sistemas con cemento Pórtland [16]; se clasifican en 2 grupos principales por su actividad hidráulica o puzolánica o ambas [43].

Los materiales puzolánicos son materiales silíceos o silíceo-aluminosos que poseen escaso o nulo valor cementante, pero que al ser finamente molidos y entrar en contacto con agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias (de 0°C a 40°C para formar compuestos que poseen propiedades cementosas [16,42] como el silicato de calcio hidratado (C-S-H). Por otro lado, la norma ASTM C618 [44], especifica que un material puzolánico debe contener al menos 70% de la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, para ser clasificado como material Clase N. Con la disminución de tamaño de partícula de los materiales, generalmente por molienda, se logra acelerar su reactividad al aumentar su finura

y área superficial específica. Los medios de activación más comunes son presentados en la Tabla 2-6. Además del requisito de un alto contenido de sílice, las puzolanas requieren ser amorfas, con alto grado de finura y pueden ser naturales, de subproductos o sintéticas [45].

El uso de materiales suplementarios o alternativos para sustituir al cemento puede disminuir la extracción de materias primas, la emisión de gases de efecto invernadero, así como el consumo de energía derivado del proceso de producción. Además, pueden obtenerse prestaciones mecánicas y de durabilidad similares o superiores a las desarrolladas por el cemento Pórtland [46,47].

Tabla 2-6 Tipos de activación de materiales suplementarios [45].

Tipo de activación	Descripción
Mecánica	Se realiza por medio de molienda (molino de bolas o planetario).
Química	Se adicionan compuesto como NaOH, Na ₂ SiO ₃ y Na ₂ SO ₃ . Se considera el medio más eficiente de activación.
Controlada por temperatura	Se utilizan elevadas temperaturas para activar los constituyentes del concreto o mortero. El medio de curado puede ser agua o aire.
Activación Térmica	Se utiliza una temperatura específica de curado dependiendo de la edad del mortero o concreto. El medio puede ser agua, aire o ambos.

Algunos subproductos industriales como escorias de alto horno, ceniza volante o humo de sílice son una fuente de materia prima para materiales cementosos suplementarios y se incluyen cotidianamente en los cementos comerciales. Sin embargo, la disponibilidad de algunos subproductos depende del grado de industrialización de los países o regiones. En la Tabla 2-7 se describen algunos materiales comunes y sus características. Por otro lado, una fuente viable y sostenible de materiales suplementarios son los residuos sólidos urbanos (RSU), tales como desechos de cerámicos y de vidrio o de actividades agrícolas como las cáscaras de arroz, mazorca de maíz y bagazo de caña [48,49].

Tabla 2-7 Materiales cementantes suplementarios comunes [48].

Material	Fuente de obtención	Características
Ceniza volante	Es obtenido de la combustión de carbón utilizado en la producción de electricidad.	Partículas esféricas con tamaños de entre 10 μm y 100 μm . Se clasifica como tipos F y C. Se consideran efectivas para mitigar la corrosión inducida por cloruros, en el acero de refuerzo embebido en concreto.
Escoria granulada de alto horno	Residuo obtenido durante el enfriamiento del hierro fundido en alto horno, por medio de agua o vapor.	Posee finura y área superficial similares al cemento Portland.
Humo de sílice	Es obtenido durante el proceso de manufactura de diversas aleaciones de silicio.	Posee alta finura, con partículas de tamaño promedio entre 0.1 μm y 0.5 μm .

2.9 Residuos sólidos urbanos y reciclaje de vidrio.

La generación de los residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel mundial está relacionada con los hábitos de las sociedades y el aumento de la población. En 2022 la población fue de alrededor de 8,000 millones de habitantes y se estima que en 2023 incremente a 10, 000 millones [50]. Por su parte, el banco mundial reportó que a nivel global en 2016 se generaron 2, 000 millones de toneladas de desechos y que en 2050 se estiman serán 3, 400 millones de toneladas [51].

En México, la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos define RSU como “los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos” [52]. Los informes nacionales sobre medio ambiente estimaron que en 2017 se generaron 44.6 millones de toneladas de RSU, aproximadamente 122 mil toneladas diarias, siendo las áreas más pobladas las mayores generadoras [53]. La composición de estos residuos y su reciclaje (expresados en %), se presentan en la Tabla 2-8. A pesar de las leyes y regulaciones existentes enfocadas a la

disposición final de los residuos en sitios diseñados para evitar su liberación al medio ambiente, aún persiste el uso de tiraderos a cielo abierto, los cuales son receptores del 75% de los RSU [54].

Tabla 2-8 Composición y reciclaje de los residuos sólidos generados en México [53].

Tipo de residuo sólido	Composición (%)	Reciclaje (%)
Comida, jardín y materiales orgánicos similares	51.6	-----
Papel, cartón y productos de papel.	14.2	28.3
Otro tipo de basura	12	4.3
Plásticos	11	10.3
Vidrios	6.1	18.5
Textiles	1.4	-----
Aluminio	1.8	14.3
Metales ferrosos	1.2	
Otros metales no ferrosos	0.7	

Con respecto a la composición de los desechos a nivel global, el vidrio representa el 5% [51]. Estos desechos generalmente provienen de contenedores y botellas de un solo uso, que pocas veces son reciclados y revalorizados en comparación con el vidrio plano, el cual es desechado en cantidades menores debido a su larga vida útil y desempeño, además de que se rigen por la demolición o remodelación de infraestructura civil y del ciclo de vida de vehículos y medios de transporte. El vidrio que no es reciclado generalmente termina en los rellenos sanitarios o en tiraderos clandestinos, ocupando grandes volúmenes de espacio y en sitios donde prevalecen altas temperaturas, pueden originar incendios debido a un efecto de lupa producido por los fragmentos de vidrio [55,56].

Teóricamente el vidrio tipo Si-Na-Ca puede ser reciclado indefinidamente sin alterar sus propiedades químicas y ser reutilizado en su propio proceso de producción, ahorrando materias primas, recursos naturales y energía térmica [30,57]. La eficiencia del proceso de reciclaje de vidrio depende en gran medida del método de recolección, selección, clasificación (por tipo y color) y limpieza (eliminación de etiquetas, remoción de contaminantes y residuos químicos). Los diferentes puntos de fusión, incompatibilidad de materiales, composición química de cada tipo de vidrio y color, no permiten que puedan ser mezclados en el mismo lote de fundición [45].

Se ha reportado que por cada tonelada de vidrio reciclado se ahorran aproximadamente: 590 kg de arena sílice, 186 kg de carbonato de sodio y 172 kg de piedra caliza, entre otros materiales [58].

A nivel mundial, en 2017 se reportó que Estados Unidos generó 11.4 millones de toneladas de vidrio, de los cuales recicló el 26.7% y desechados cerca de 7 millones de toneladas [59]. Por otro lado, en Europa en 2018 se recicló en promedio 74% del vidrio utilizado. Bélgica y Suecia y Luxemburgo reciclan el 98.8%, 97.7% y 98.4%, respectivamente, mientras que Alemania 83%, Francia 76.2%, Italia 85.2% y Reino Unido 68.5% [60]. Por su parte, China genera 20 millones de toneladas de desechos de vidrio anualmente, de los cuales recicla alrededor del 53.5% [61]. En México, cada año se generan aproximadamente 2.5 millones de toneladas de vidrio, de los cuales se recicla entre el 9.6% y el 12% [1]. La Tabla 2-9 presenta las cantidades de contenedores de vidrio son desechados y reciclados en diferentes países.

Tabla 2-9 Contenedores de vidrio desechados y reutilizados o reciclados a nivel global [62].

Contenedores de vidrio (millones de toneladas)		
País (año)	Desechados	Reutilizados o reciclados
Unión Europea y Turquía (2015)	16	11
E.U.A. (2013)	10	3.4
Canadá (2013)	1.1	1.1
Rusia (2014)	7	1.4
Brasil (2014)	1.4	0.6
Nueva Zelanda (2014)	0.3	0.2
India (2017)	2.3	1.6
China (2015)	20	5
Japón (2014)	1.5	0.3
Australia	1.1	0.6
Egipto	≥1.9	≤0.5
África del sur	1.1	0.6

2.10 Uso del vidrio en la industria de la construcción.

Los primeros estudios del vidrio como agregado grueso en concretos se publicaron en la década de 1960. Se ha reportado que su uso entre 20% y 60% redujo la adhesión entre partículas, revenimiento y trabajabilidad, contenido de aire y densidad [63-65]. Además, puede presentarse un incremento de aire contenido, debido a la forma irregular del vidrio y a su pobre compactación dentro del concreto [66].

El vidrio como agregado fino en morteros de cemento activados por álcalis mejora las propiedades de consistencia, trabajabilidad, contracción plástica (origen de grietas), revenimiento y segregación de agua. También puede mejorar la resistencia al ataque por ácidos, altas temperaturas y penetración de cloruros [14]. De igual manera se ha reportado que el uso de vidrio como agregado fino puede dar lugar a la reacción nociva álcali-sílice, la cual causa expansión y agrietamiento y ocurre entre algunos tipos de agregado con alto contenido de sílice y iones hidroxilos presentes en la solución de poro. Diversos autores han reportado que la expansión característica derivada de la reacción mencionada, disminuye al utilizar partículas menores a 50 μm , por lo que su uso como reemplazo de cemento en morteros [14,58,67,68] y concretos [69,70-72] es una opción viable.

El vidrio, como sustituto parcial de cemento, se involucra mediante la reacción puzolánica con la Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formada durante la hidratación de los silicatos de calcio del cemento [13,45,73]. Durante tal reacción la estructura del vidrio es atacada por el medio alcalino y se disuelve, mientras que las especies iónicas de Si^{+4} reaccionan con los iones Ca^{2+} para formar C-S-H [72].

La distribución del tamaño de partícula es un factor que influye en el desarrollo de resistencia mecánica, dado que la reactividad del vidrio depende del tamaño y área superficial específica [72,74]. Partículas con tamaños menores a 100 μm incrementan la reactividad puzolánica [75,76] y mejoran la densificación microestructural de pastas en morteros y concretos, favoreciendo la resistencia mecánica (RMC) y la durabilidad [9,77]. Estas propiedades están en función de la proporción de reemplazo (% en peso de cemento) y de las condiciones de curado [19].

En pastas de cemento con relación a/c de 0.40 y con 10% de sustitución de cemento por vidrio, las RMC obtenidas fueron 52, 63 y 82 MPa a 28, 90 y 365 días de curado bajo agua a temperatura ambiente), respectivamente. Con 20% de sustitución y para las mismas edades de curado, las resistencias fueron similares: 50, 65 y 85 MPa, respectivamente. Las RMC a 90 y 365 días de curado, fueron superiores a los desarrollados por las muestras de control (55 MPa y 80 MPa, respectivamente) [75]. También se ha reportado que concretos con contenido de 10% y 20% de vidrio y con relación a/c de 0.38, con edades de curado entre 28 y 90 días, incrementaron sus RMC en 10 y 18 MPa, respectivamente [69].

En el caso de morteros, Aliabdo y colaboradores [78] reportaron aumentos de 6% y 9% de RMC a 7 días de curado, con sustitución de 5% y 10% de cemento por vidrio. En tanto que con contenido de 15%, se presentó una reducción de 9.7%. En el caso de concretos, también reportaron el desarrollo de 32, 34, 30.7 y 29 MPa en muestras con reemplazos de 0%, 5%, 10% y 15%, a 28 días de curado. Tanto en morteros como concretos, el tamaño de partícula del vidrio fue de 75 μm y la relación a/c fue de 0.50.

Por otro lado, la sustitución de 20% y hasta 30% de vidrio en morteros y concretos, puede reducir la penetración de ion cloruro entre 40% y 49%; esto puede atribuirse al decrecimiento de la porosidad y conectividad entre poros, lo cual limita el transporte de cloruros [63, 69].

Por su parte, Anwar en 2016 [79]. reportó concretos con relación a/c de 0.38 y con reemplazos de 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50%, siendo las muestras con 5%, 10% y 15% las que obtuvieron altas RMC (52, 55.5 y 50 MPa, respectivamente) a 28 días de curado bajo agua. Du y Tan en 2017 [72] reportaron que concretos con relación a/c de 0.48 y con 15% y 30% de vidrio desarrollaron 30 y 60 MPa a 7 y 365 días de curado, respectivamente. También reportaron que con sustituciones mayores a 30%, el hidróxido de calcio se vuelve insuficiente para la reacción puzolánica del vidrio. Por su parte, Jiang y colaboradores [63] reportaron en 2019 que morteros con reemplazo parcial de 5%, 10% y 20% no sufrieron cambios significativos con respecto a la RMC, aún después de ser expuestos a temperaturas entre 500°C y 800°C. Cabe mencionar que se han reportado losas y muros de concreto con 20% de vidrio como material suplementario, los cuales a 7 años de evaluación mostraron mejoramiento en el desempeño de sus resistencias, mecánica y a la penetración del ion cloruro, debido a la reactividad puzolánica. También se reportó disminución de porosidad y absorción de agua, debido a la densificación de la microestructura [80].

2.11 Cementos activados por álcalis.

Los cementos activados por álcalis (CAA) abarcan los sistemas derivados de la reacción entre un precursor y un activador alcalino. Los CAA pueden ser del tipo de una parte: polvo de precursor + polvo de activador alcalino + agua; o de dos partes: polvo de precursor + activador alcalino en solución acuosa; esta última es la más empleada [81].

Los activadores alcalinos más efectivos son NaOH, Na₂CO₃, Silicato de sodio o mezclas de estos [82]. Los silicatos de sodio son compuestos inorgánicos formados a partir de la fusión (1,000-1,400 °C) de Na₂CO₃ y arena sílice en diversas proporciones; la mezcla resultante es enfriada y los fragmentos resultantes son disueltos en agua bajo condiciones controladas de presión y calor, obteniéndose un material líquido con alta viscosidad [83]. Los activadores alcalinos son materiales que requieren equipo de seguridad y protección personal para su manejo, ya que son corrosivos.

En el caso de los precursores, es necesario que tengan una estructura predominantemente amorfa, para que puedan ser susceptibles al ataque alcalino. El tamaño de partícula, morfología, área superficial y composición química, afectan de manera directa las propiedades de los CAA. La ceniza volante, arcillas como metacaolín, escoria de alto horno, entre otros, son materiales puzolánicos típicamente utilizados [17,84,85]. En el caso de los RSU, se han utilizado desechos de vidrio, concretos o residuos agroindustriales como bagazo de caña y cáscaras de arroz [47,85,86]. Las ventajas del uso de RSU incluyen: reducción de desechos y liberación de espacios en sitios de disposición final, reducción de costos, consumo de materias primas y energía [17]. De manera general estos cementos pueden ser agrupados en 5 categorías dependiendo del precursor utilizado como se presenta en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10 Categorías de cementos alcalinamente activados [15].

Categoría	Precursor/es
Base escoria	<ul style="list-style-type: none"> ✓ escoria de alto horno ✓ escoria de fósforo ✓ escoria de alto horno-ceniza volante ✓ escoria de alto horno- escoria de hierro ✓ escoria de alto horno-escoria de óxido de magnesio
Con puzolanas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ceniza volante ✓ puzolanas naturales ✓ metacaolín, ✓ vidrio tipo Si-Na-Ca
Cal-puzolana/escoria	<ul style="list-style-type: none"> ✓ cal-puzolana natural ✓ cal-ceniza volante ✓ cal-metacaolín ✓ cal-escoria de alto horno
Con contenido de aluminato de calcio (AC)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ metacaolín-AC ✓ puzolanas-AC ✓ ceniza volante-AC
Híbridos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baja proporción de cemento con contenido de: ✓ escoria de alto horno ✓ escoria de fósforo ✓ ceniza volante ✓ escoria de alto horno-escoria de hierro ✓ escoria de alto horno-ceniza volante

El uso del vidrio en CAA es viable debido a su composición química (Si-Na-Ca) y a su estructura amorfa, lo que facilita su disolución en un ambiente altamente alcalino [63]. La solubilidad de la sílice amorfa del vidrio incrementa para pH entre 9 y 10.7, liberando especies de ion silicato; para $\text{pH} > 10.7$, la fase sólida de sílice amorfa se disuelve por completo. La temperatura de curado también tiene un efecto en el proceso de solubilidad y velocidad de las reacciones durante las primeras horas [87]. A mayor tiempo de curado, las propiedades mecánicas mejoran.

Los CAA de 100% vidrio son solubles en agua porque el producto cementoso formado es un gel de sílice modificado con sodio [88]. Para contrarrestar la deficiencia de CaO se utilizan otros precursores como roca caliza (CaCO_3), la cual es abundante y barata. La incorporación de caliza beneficia las propiedades mecánicas, hidratación temprana y durabilidad. Se han reportado CAA base 100% caliza ($600 \text{ m}^2/\text{kg}$) activada con NaOH y silicato de sodio, con RMC de 15-25 MPa a un año; la caliza liberó iones Ca^{2+} para formar compuestos de silicato de sodio hidratados [89]. También se ha reportado que la caliza como precursor complementario de vidrio y como agregado fino promueve la formación de una microestructura densa y compuestos cementosos insolubles en agua con buena RMC [90]. Existen diversas formulaciones de CAA en función del tipo de precursor y activador alcalino; las propiedades mecánicas resultantes pueden ser variables y por lo tanto las aplicaciones son diversas, desde muros no portantes, bloques y diseños arquitectónicos, pero también en losas, concretos prefabricados y en concretos con acero de refuerzo, donde la alta alcalinidad de los cementos activados puede favorecer la protección del acero de refuerzo embebido [81]. A pesar del excelente potencial de aplicaciones de los CAA, en muchos países no existe el marco normativo para su aplicación en la práctica.

2.12 Etapas de reacción en los cementos activados por álcalis.

a) Etapa 1, destrucción de enlaces.

Los iones OH^- del activador alcalino inician la ruptura de los enlaces Si-O-Si, liberando especies $-\text{Si}-\text{OH}$ y $-\text{Si}-\text{O}^-$. La presencia de cationes metálicos alcalinos neutraliza la carga negativa resultante [91,92].

b) Etapa 2, condensación.

Los monómeros de silicio reaccionan entre sí formando dímeros (Si-O-Si), los cuales reaccionan con otros monómeros para formar polímeros. El contacto entre los productos disgregados forma estructuras. Estas reacciones son catalizadas por iones OH^- [92].

c) Etapa 3, condensación-cristalización.

La presencia de partículas en la fase sólida inicial promueve la precipitación de productos cuya composición es determinada por la composición química y mineral de la fase inicial, el componente alcalino utilizado y las condiciones de curado [92].

2.13 Durabilidad de los concretos.

Un concreto durable se considera como aquel que resiste agentes agresivos (presentes en el entorno de servicio) conservando su forma original, calidad y funcionalidad. Por su parte, la vida de servicio se define como el tiempo requerido para que el contenido de cloruros aumente; ya sea por capilaridad, presión hidrostática o difusión, hasta el umbral que indica el inicio de corrosión en el acero de refuerzo. Una larga vida de servicio es considerada como sinónimo de durabilidad [92]. Las condiciones que pueden afectar la durabilidad y vida de servicio de los concretos se relacionan con su exposición a climas o microclimas agresivos: altas o muy bajas temperaturas, alta humedad relativa y corrosión del acero de refuerzo embebido debido a la presencia de iones cloruro, SO_2 , CO_2 , entre otros [93,94,95].

2.13.1 Corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto.

El acero de refuerzo embebido en concreto posee protección física del medio exterior en función del grosor de dicho concreto. También posee protección química debido a la formación en la superficie del acero de una capa termodinámicamente estable. Esta capa (denominada también pasiva) resulta de la interacción con la solución de poro, cuyo pH entre 12.5 y 14 asegura su estabilidad. A su vez, la capa pasiva está conformada por subcapas de óxidos e hidróxidos: $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\alpha\text{-FeOOH}$, $\gamma\text{-FeOOH}$ y $\beta\text{-FeOOH}$ [96]. Sin embargo, el deterioro de esta capa puede ocurrir debido a la disminución del pH como consecuencia de la carbonatación (absorción de CO_2) y debido al ataque localizado de especies agresivas como ion cloruro y SO_2 .

2.13.2 Carbonatación.

La presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cual representa entre 20-25% del total de productos de hidratación en los concretos, proporciona una alta alcalinidad con valores de pH de entre 12.5 y 13, a la solución de poro. Esta alcalinidad es requerida para mantener intacta la capa de protección (capa pasiva) formada en la superficie del acero de refuerzo y evitar corrosión en ella [97], ya que si el pH decrece entre 9 y 9.5 [27] se produce carbonatación del concreto. Esto facilita el ingreso de cloruros y otros contaminantes del medio ambiente, que pueden alcanzar la capa pasiva y destruirla. La carbonatación del concreto es un fenómeno que se propaga al interior conforme pasa el tiempo y tiene lugar cuando hidróxidos alcalinos, por ejemplo, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Na}(\text{OH})$ y KOH , entran en contacto con CO_2 ambiental, el cual se difunde a través del concreto por medio de los poros [98] y reacciona de la siguiente manera: primero, el agua reacciona con el CO_2 de la atmosfera produciendo H_2CO_3 (ecuación 1). Entonces el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la solución de poro y el H_2CO_3 forman CaCO_3 y agua (ecuación 2) o también puede ser que el H_2CO_3 y el $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ formen CaCO_3 , SiO_2 y agua (ecuación 3). Reacciones similares ocurren con el $\text{Na}(\text{OH})$ y KOH [99]



2.13.3 Corrosión del acero de refuerzo en ambiente marino.

Las estructuras de concreto expuestas en ambientes con alta presencia de cloruros, como las zonas costeras, sufren daño con mayor facilidad y de manera frecuente. Los cloruros se originan a partir del rompimiento de olas en la costa y la aerotransportación del aerosol marino. El número y tamaño de las partículas o gotas da lugar a concentraciones de sal con incremento exponencial y a altas velocidades del viento, algunas partículas pueden viajar algunos cientos de metros tierra adentro antes de desvanecerse. El ingreso y transporte de cloruros dentro del concreto es a través de los poros, involucrando procesos como: difusión, capilaridad, absorción, convección y permeabilidad [100,101].

Cuando los cloruros ingresan al concreto y llegan a la capa pasiva, se dan repetidos eventos de despasivación y re-pasivación. Si la cantidad de cloruros que ingresaron supera cierto umbral, la capa pierde su estabilidad y su capacidad protectora, por lo que se rompe y da lugar al inicio del proceso de corrosión del acero de refuerzo [102,103]. El umbral de cloruros se define como la mínima cantidad de cloruros en la interfase acero-concreto que es necesaria para producir una densidad de corriente de corrosión de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($1 \mu\text{m}/\text{año}$) e iniciar con ello la despasivación del acero de refuerzo, el cual se considera el inicio de corrosión [96]. Generalmente el umbral de cloruros es expresado como el contenido total de cloruros en porcentaje en peso de material cementoso (ppmc) [104] y se ve influenciado por: fuente de cloruros y condiciones de exposición, los tipos de cementantes, proporciones de mezcla, porosidad, defectos superficiales del concreto, pH de la solución de poro, potencial electroquímico, composición química y estado del acero e interfase acero-concreto [96,105]. Diversos autores han propuesto diferentes valores del umbral de cloruros, los cuales se presentan en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11 Umbrales de cloruros reportados en la literatura.

Umbral reportado (% en peso)		Fuente
Cloruros totales <i>0.15% - 2.5%</i>		[106]
Cloruros totales <i>0.04% - 8.34%</i>		[104]
95% despasivación Cloruros libres <i>0.497 % - 0.569%</i> Cloruros totales <i>0.632% - 0.771%</i>		[107]
Cloruros totales		[108]
pH 12.6	<i>0.05% -0.45%</i>	
pH 13.3	<i>0.6-2.1%</i>	
pH 13.6	<i>1.8- 4.2%</i>	
Cloruros totales En laboratorio <i>1.82% - 2.45%</i> En campo <i>0.88% -1.58%</i>		[109]
Cloruros totales <i>~ 0.2%</i>		[110]
Cloruros totales <i>0.3% -1.1%</i>		[111]
Cloruros totales <i>0.15% - 0.45%</i>		[112]

Para un mayor entendimiento de la relación del contenido de cloruros y el grado de corrosión del acero de refuerzo con respecto al tiempo, se propuso el modelo de Tutti (Figura 2-2) el cual considera el contenido de cloruros asociado con el deterioro aceptable del acero en una estructura de concreto [104]. Este modelo considera dos fases:

- 1.- Inicio: los agentes agresivos externos penetran dentro del concreto hasta alcanzar el acero de refuerzo, lo que causa una despasivación de la capa protectora.
- 2.- Propagación: La corrosión intensifica su proceso causando la degradación del acero de refuerzo. Si la corrosión es uniforme, es posible verificar la reducción de la sección nominal del acero. Esta reducción disminuye la capacidad de carga del acero de refuerzo, así como sus resistencia y funcionalidad. También se da un aumento de volumen del acero debido a la expansión de los óxidos. Esto genera presiones internas que provocan agrietamiento y deterioro del concreto [102].

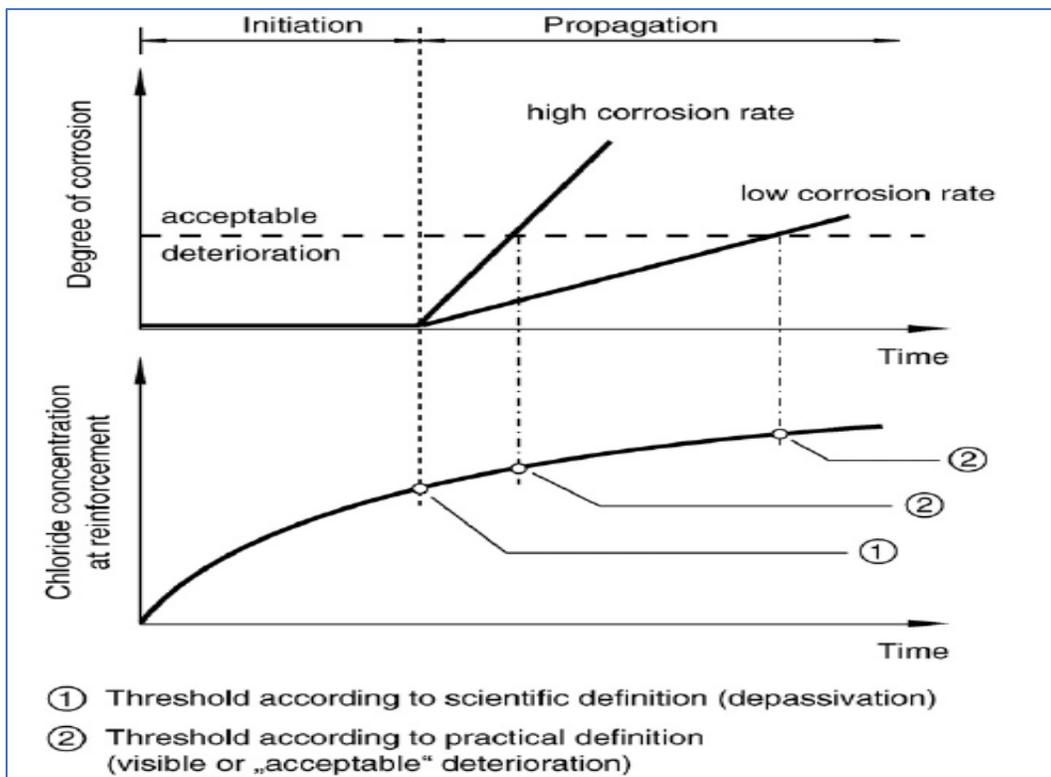


Figura 2-2 Definición de umbral de cloruros basado en el modelo de Tutti [104].

2.14 Técnicas electroquímicas para la evaluación de corrosión del acero de refuerzo.

2.14.1 Potencial de corrosión.

El potencial eléctrico o potencial de corrosión (*E_{corr}*) proporciona una aproximación del estado de conservación en que se encuentra el acero de refuerzo embebido. La norma ASTM C876 [113] describe el procedimiento para determinar *E_{corr}* a nivel laboratorio o en campo teniendo al electrodo de Cu/CuSO₄ saturado (CSE) como referencia. Los potenciales de corrosión señalados en la norma pueden ser convertidos a potenciales equivalentes con respecto al electrodo de referencia utilizado, mediante la norma ASTM G215 [114], la cual considera al electrodo estándar de hidrógeno (SHE) como el electrodo de referencia principal. En este trabajo utilizamos como referencia el electrodo saturado de calomelanos (SCE).

La medición requiere que el acero no este recubierto y que los morteros o concretos no estén carbonatados. Los valores obtenidos indican la presencia o ausencia de corrosión en un área específica del acero y se consideran los siguientes casos:

- a) Valores más positivos que -200 mV vs CSE o su equivalente a -140 mV vs SCE: existe un 90% de probabilidad de que no esté ocurriendo corrosión.
- b) Valores entre -200 mV y -350 mV vs CSE o su equivalente a valores entre -140 mV y -290 mV vs SCE: la actividad de corrosión se considera incierta.
- c) Valores más negativos que -350 mV vs CSE o su equivalente a -290 mV vs SCE: existe un 90% de probabilidad de que esté ocurriendo corrosión.

2.14.2 Resistencia a la polarización y densidad de corriente de corrosión.

La densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) se obtiene a partir de medir la resistencia de la polarización lineal (R_p), la cual es una técnica no destructiva y que se basa en imponer polarizaciones ≤ 20 mV al metal a partir de su potencial de corrosión (Ecuación 4). La i_{corr} se calcula a partir de la ecuación de Stern-Geary corregida (Ecuación 5), donde R_s es la resistencia del concreto, B es una constante que relaciona el sistema acero-concreto y toma valores de 26 mV en condiciones de corrosión o 52 mV en estado pasivo. A es el área del electrodo de trabajo [112]. Si el proceso de corrosión es uniforme, la i_{corr} puede ser considerada como una tasa de corrosión, la cual puede expresarse como pérdida de material con respecto al tiempo ($\mu\text{m/año}$) utilizando el factor $11.6(i_{corr})$ [115].

$$R_p = [\Delta E / \Delta I]_{\Delta E \leq 20 \text{ mV}} \quad (4)$$

$$i_{corr} = B / (R_p - R_s) \text{ A} \quad (5)$$

Varios autores [116-118] consideran que valores de i_{corr} menores a $0.10 \mu\text{A/cm}^2$ ($<1 \mu\text{m/año}$) corresponden a una condición pasiva del acero de refuerzo o riesgo de corrosión despreciable; entre $0.10 \mu\text{A/cm}^2$ y $0.50 \mu\text{A/cm}^2$ ($1 \mu\text{m/año}$ y $5.8 \mu\text{m/año}$), de baja a moderada corrosión; entre $0.50 \mu\text{A/cm}^2$ y $1 \mu\text{A/cm}^2$ ($5.8 \mu\text{m/año}$ y $11.6 \mu\text{m/año}$), de moderada a alta; y superiores a $1 \mu\text{A/cm}^2$ ($>11.6 \mu\text{m/año}$), alta corrosión. En este trabajo se considera $0.10 \mu\text{A/cm}^2$ ($1 \mu\text{m/año}$) como valor de inicio de corrosión.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Acondicionamiento de materiales: caracterización de polvos y agregados.

3.1.1 Caracterización de polvos.

Se recolectaron botellas de vidrio y se clasificaron por colores; estas se sometieron a limpieza para eliminar residuos, contaminantes orgánicos y etiquetas. Se trituraron series de 100 botellas en iguales proporciones de colores (verde, azul, ámbar y transparente). Posteriormente, los fragmentos de vidrio se pulverizaron en un molino de bolas durante 8 horas. Se utilizó malla de acero inoxidable #400 (tamaño de partícula entre 36 – 40 μm) [119] para tamizar el polvo de vidrio. La Figura 3- 1 presenta el proceso de trituración y molienda descrito.

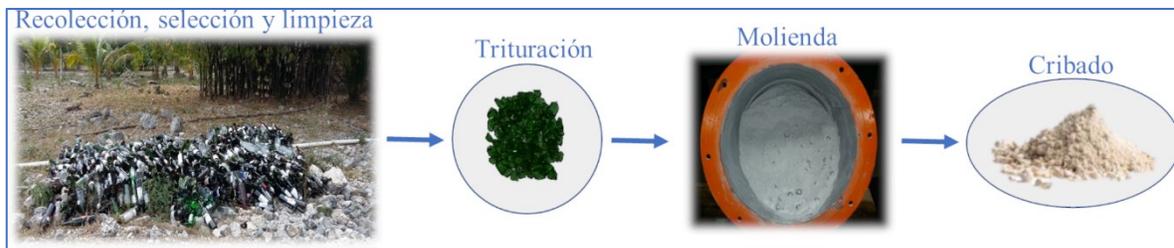


Figura 3-1 Proceso de recolección, trituración, molienda y cribado de vidrio.

Por su parte, la Figura 3-2 presenta la distribución de tamaño de partícula (Figura 3-2 a) y micrografía de las partículas de vidrio a 1000X (Figura 3-2 b) obtenidas por microscopía electrónica de barrido (FESEM JEOL). Para este análisis las muestras se secaron en un horno a 100°C durante 24 horas. Previo al montaje de las muestras en el microscopio, los polvos se recubrieron durante 40 segundos con una capa de Au/Pd para mejorar su conductividad eléctrica. En la micrografía apreciarse la morfología angular característica de las partículas de vidrio.

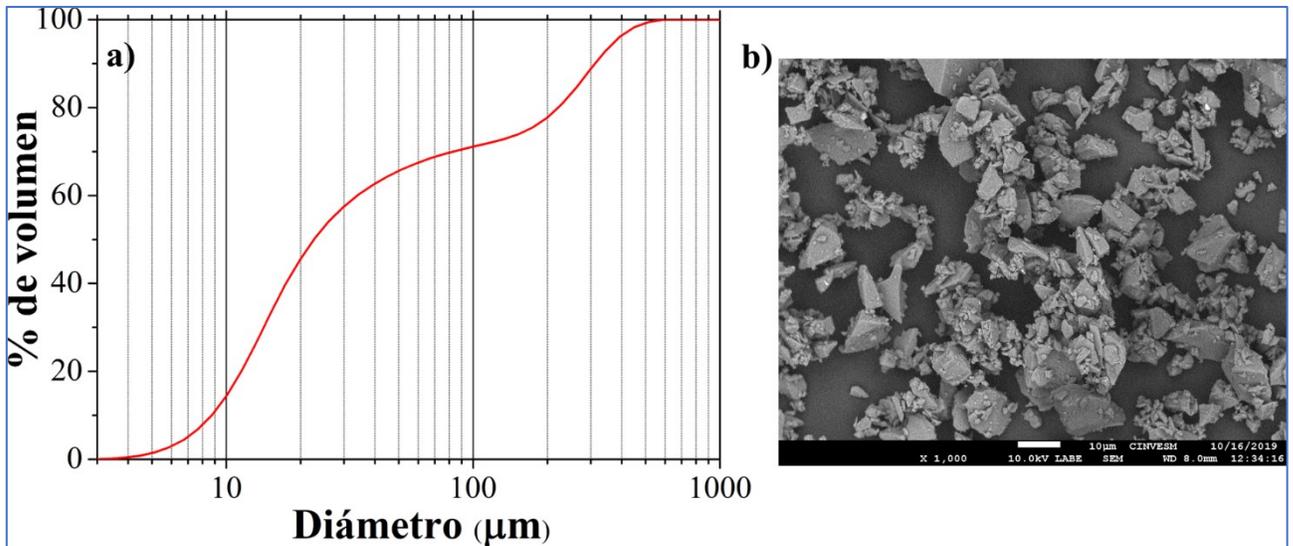


Figura 3-2 a) distribución de tamaño de partícula y b) micrografía de partículas de vidrio a 1000X.

En el caso del vidrio utilizado en los cementos activados por álcalis, se recolectaron botellas de diversos colores y se pulverizaron en un molino de bolas durante 2 horas. El polvo obtenido se tamizó en malla de acero inoxidable #18 [119] para eliminar los fragmentos no pulverizados. Como material precursor complementario y como fuente de CaO se usó agregado grueso de roca caliza (CaCO_3) de la península de Yucatán. Para eliminar la humedad, el agregado se secó en horno a 110°C por 24 horas y después se pulverizó en un molino de bolas durante 1 hora y 15 minutos en lotes de 20 kg. Se utilizó malla de acero inoxidable número #18 para eliminar fragmentos no pulverizados. La Figura 3-3 presenta la distribución de tamaño de partícula del vidrio y de la caliza (a) y micrografía de las partículas de caliza a 1000X (b). Los valores de densidad, tamaño medio del diámetro de partícula (Analizador láser Horiba LA-950) y finura (Método de permeabilidad al aire Blaine) del vidrio y caliza pulverizados se presentan en la Tabla 3-1.

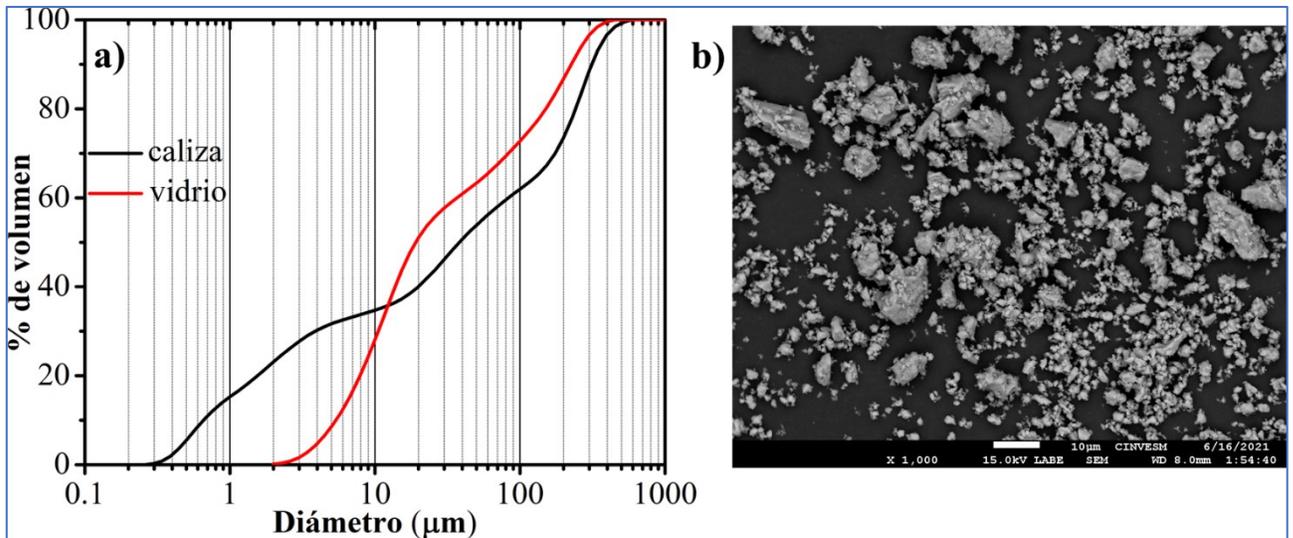


Figura 3-3 a) distribución de tamaño de partícula de vidrio y caliza y b) micrografía de partículas de caliza a 1000X.

Tabla 3-1 Caracterización de vidrio y caliza pulverizados.

Materiales	Densidad (g/cm³)	Tamaño medio del diámetro de partícula (µm)	Finura (m²/kg)
vidrio como reemplazo parcial	2.5	23-26	455-457
vidrio como precursor	2.5	19-20	607-626
caliza (Yucatán) como precursor	2.5	39-45	642-694

La Figura 3-4 presenta los patrones de DRX (Bruker D-8 Advance, radiación Cu α a 40kV y 30 mA, rango 5-70°2 θ y paso de 0.03°2 θ cada 0.5 segundos) de polvos de cemento Portland, caliza y vidrio. Los polvos se molieron en mortero de ágata para tener un tamaño óptimo para el análisis. En el cemento se identificaron picos de calcita, alita y belita, mientras que en la caliza se identificaron picos de calcita. El vidrio presentó solamente el halo amorfo característico de materiales amorfos entre 15° - 40°.

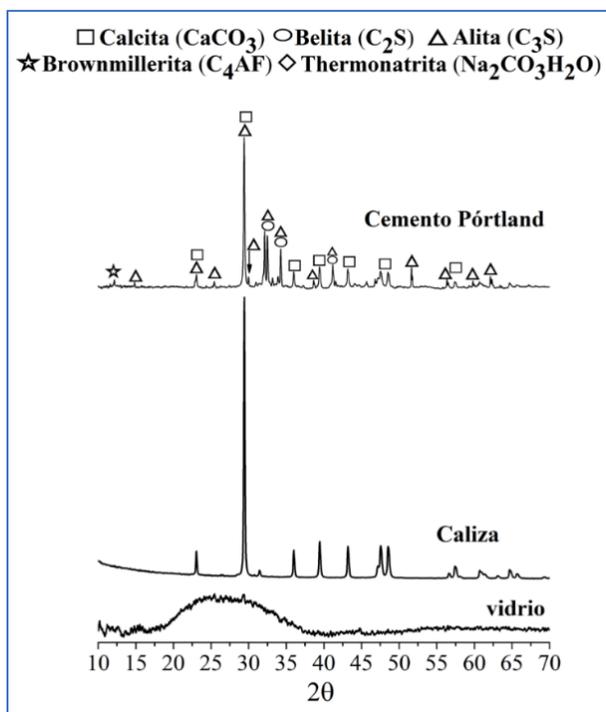


Figura 3-4 Patrones de DRX de cemento Portland, caliza y vidrio.

3.1.2 Caracterización de agregados.

Para la preparación de muestras de morteros y concretos que serían ensayados, se utilizaron agregados fino y grueso como se menciona en la Tabla 3-2. Estos agregados se caracterizaron con respecto a densidad y absorción (ASTM C128-22) [120], módulo de finura, tamaño máximo, granulometría [121,122] y contenido de humedad ASTM C70-20 [123].

Tabla 3-2 Sistemas de muestras, tipo de agregado y su caracterización.

Tipo de muestra	Ensayo	Tipo de agregado	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)	Módulo de finura	Tamaño Máximo (mm)	Contenido de humedad (%)
Concretos con y sin acero de refuerzo	RMC, concentración de cloruros y carbonatación	Grueso (Yucatán)	2.3 - 2.5	4.1	-----	9.5 (3/8 de pulgada)	0.7
		Fino (Yucatán)	2.3-2.5	4.7- 4.8	2.7- 4.4	4.7	6.9
Morteros con CAA	RMC	Fino (caliza Coahuila)	2.7	3.5	4.3	4.7	-----

La Figura 3-5 presenta las curvas granulométricas de las arenas utilizadas. Algunos puntos de la curva granulométrica de las arenas estuvieron ligeramente por debajo del límite inferior del porcentaje de agregado que debe pasar la malla, considerado en la norma ASTM C33/C33M [121].

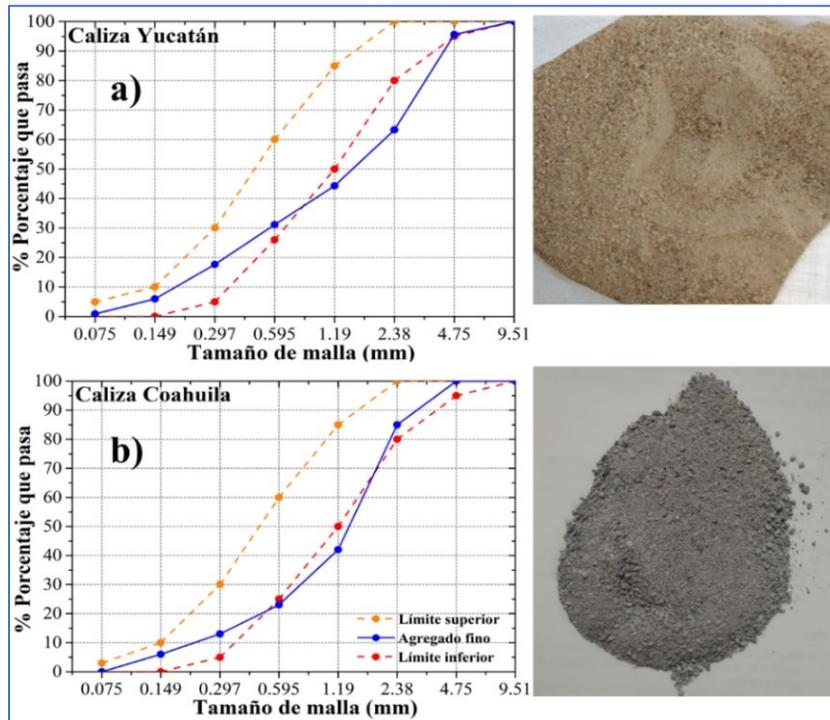


Figura 3-5 Curvas granulométricas de a) arena caliza de Yucatán b) arena caliza de Coahuila.

3.2 Preparación de muestras.

3.2.1 Concretos con acero de refuerzo embebido y sustitución parcial de cemento.

Se prepararon muestras de concretos, con acero embebido en el centro de la muestra y sin él (Tabla 3-2), con relaciones a/c de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70, realizando sustitución parcial de cemento CPC-30R por vidrio en proporciones de 0% (muestras de control), 5%, 10% y 15% (porcentaje en peso). Se utilizaron agregados fino y grueso tipo caliza de la Península de Yucatán. Las cantidades de los materiales utilizados se presentan en la Tabla 3-3.

Los agregados, el cemento y el agua calculados para cada relación a/c se mezclaron en una máquina revoladora para lograr una completa homogenización. Las mezclas obtenidas se vaciaron en moldes cilíndricos, cuyas dimensiones dependieron del ensayo o medición considerados: 15 cm de diámetro x 30 cm de altura para ensayos de resistencia mecánica a la compresión y 7.5 cm de diámetro x 15 cm de altura para ensayos de durabilidad. Para una correcta distribución de la mezcla en el interior de los moldes, se utilizó una varilla de apisonamiento [127]. Después de 24 horas, las muestras se desmoldaron y se curaron por inmersión en agua saturada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura ambiente promedio entre 27 °C y 36°C.

Tabla 3-3 Materiales utilizados en las mezclas de concretos.

kg/m ³					
a/c	CPC-30R	vidrio	arena	grava	agua
0.40	525	0	645	870	216
	524.5	27.6			
	497	55			
	469	83			
0.50	443	0	740	870	220
	421	22			
	399	44.5			
	376.5	66.5			
0.60	368	0	803	870	220
	349.6	18.5			
	331	37			
	313	55			
0.70	315	0	849	870	220
	299	16			
	283.5	31.5			
	267.7	47			

Los ensayos de RMC se realizaron a 28, 90, 270, 360 y 540 días de curado con respecto a la norma ASTM C39/C39M [124]. Para evaluar la durabilidad de los concretos, se expusieron muestras en ambiente marino hasta por 48 meses con retiros semestrales, en las cuales se midieron el desarrollo del frente de carbonatación y concentración de cloruros [125]. También se expusieron muestras con electrodos de trabajo (acero de refuerzo comercial #3) y referencia (barra de titanio) embebidos para realizar mediciones de potencial de corrosión con respecto a la norma ASTM C876 [113] y resistencia a la polarización lineal, utilizando un Potenciostato/Galvanostato/ZRA (modelo Reference 600 Gamry instruments). Durante las mediciones, también se utilizó un contraelectrodo, el cual consistió en una malla conductora instalada en la periferia de las muestras. En la Figura 3-6 Esquema de la configuración de los electrodos utilizados en muestras de concreto [93,95].se presenta la configuración de los electrodos mencionados.

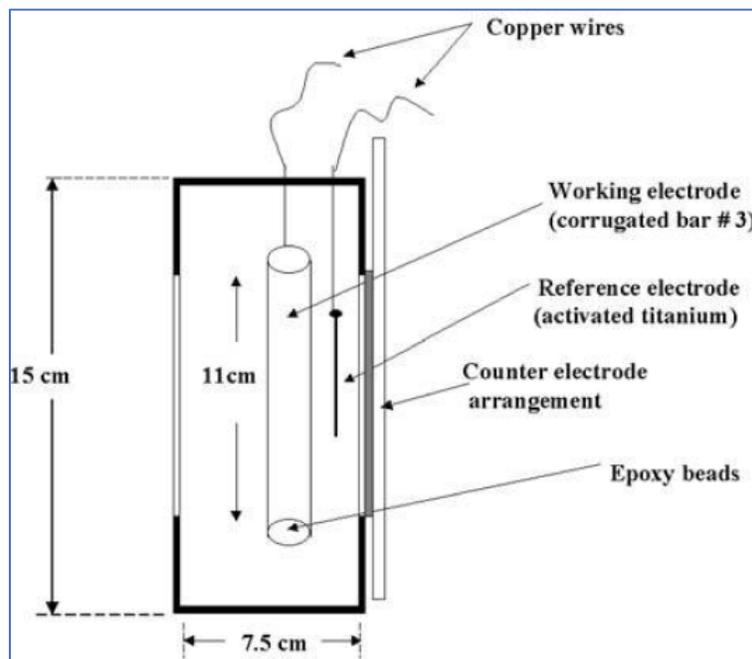


Figura 3-6 Esquema de la configuración de los electrodos utilizados en muestras de concreto [93,95].

3.2.2 Condiciones y características del sitio de exposición.

Se eligió la estación Marina de Cinvestav ubicada en Telchac Puerto, Yucatán ($21^{\circ} 20'28''\text{N}, 89^{\circ} 18'25''\text{W}$, distancia al mar de 50 metros) como sitio de exposición (Figura 3-7). Las condiciones de este ambiente marino tropical son: radiación solar promedio anual entre $3,600 \text{ W/m}^2$ y $4,800 \text{ W/m}^2$, humedad relativa de 88%-96%, temperatura promedio anual entre 27°C y 32°C y precipitación pluvial promedio anual mayor a $1,000 \text{ mm}$ (*datos obtenidos de la estación meteorológica de Cinvestav-Mérida*). Por otro lado, la tasa promedio anual de depósito de cloruros es de $130.5 \text{ mgCl}^{-}/\text{m}^2.\text{día}$ y la de SO_2 $4.7 \text{ mgSO}_2/\text{m}^2.\text{día}$. Otros contaminantes son despreciables debido a la poca presencia de fuentes antropogénicas. La categoría de corrosividad de este sitio es extrema (CX), por lo que se pueden tener tasas de corrosión de entre $200 \mu\text{m/año}$ y $700 \mu\text{m/año}$ en aceros sin recubrimiento [126].

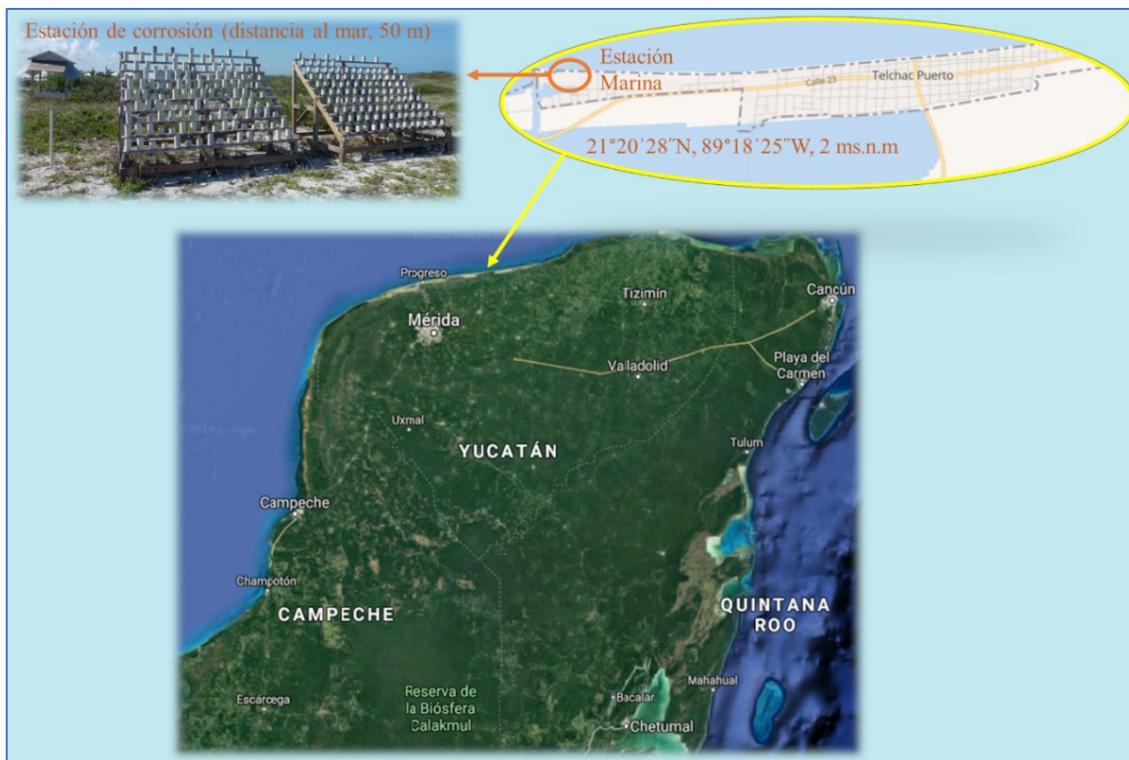


Figura 3-7 Ubicación del sitio de exposición.

En la Figura 3-8 se presentan las tasas promedio de depósito de cloruros medidos hasta por 70 meses. Se observan máximos y mínimos, debido a que en la Península de Yucatán ocurren diversos fenómenos climatológicos durante el año; en noviembre, diciembre, enero y febrero generalmente se presentan frentes fríos (que pueden durar entre 2 y 5 días) y nortes que pueden dar lugar a vientos de entre 35 km/h-100 km/h, los cuales influyen directamente en el aumento del depósito de cloruros en los colectores. De junio a octubre se presenta la época de lluvias y también la temporada de huracanes. A partir de mayo se registran altas temperaturas y entre junio y agosto es el periodo canicular.

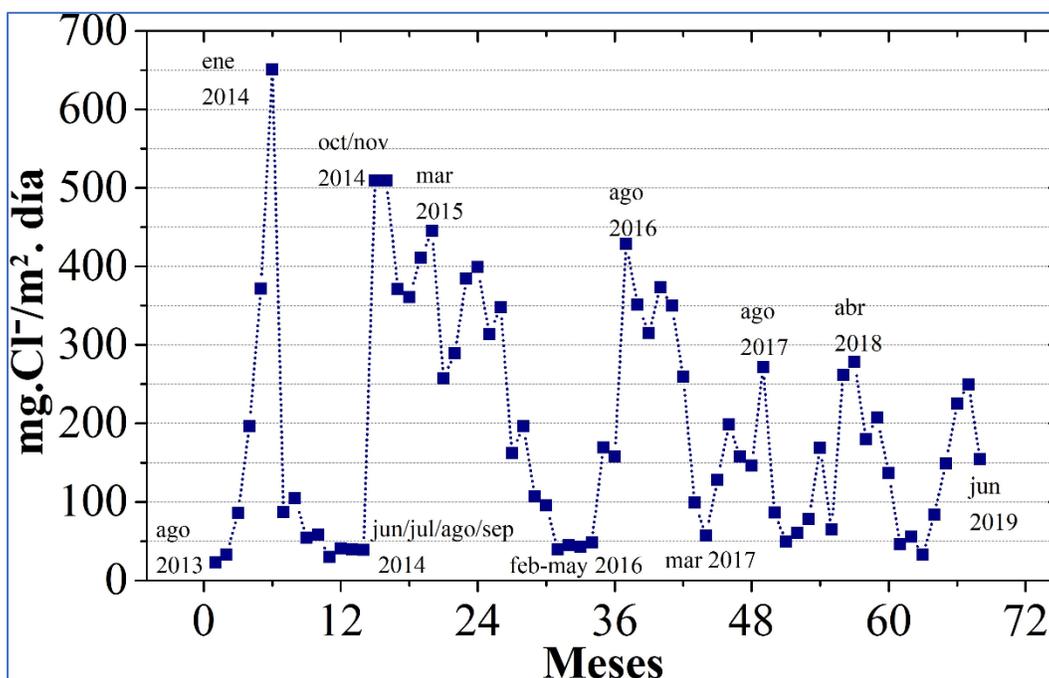


Figura 3-8 Tasa de depósito de iones cloruro (agosto 2014 a junio 2019) medidos en el sitio de exposición.

En la Figura 3-9, puede notarse que en noviembre, diciembre y enero se presentaron valores de depósito entre 20 mgSO₂/m².día y 32 mgSO₂/m².día, lo cual puede deberse a la presencia de frentes fríos y nortes que aerotransportan estos contaminantes a mayores distancias.

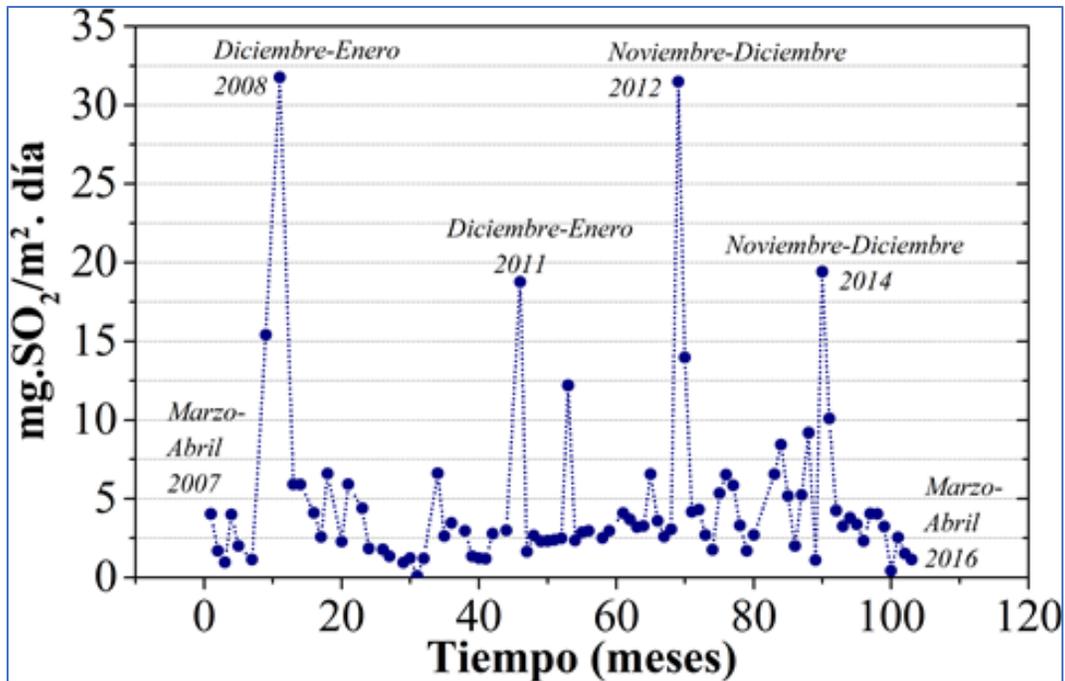


Figura 3-9 Tasa de depósito de dióxido de azufre medidos en el sitio de exposición.

3.3 Medición de carbonatación y concentración de cloruros en el concreto.

Para medir el desarrollo de la profundidad de carbonatación, primero se aplicó por medio de atomización una solución de fenolftaleína al 1% (10 g de fenolftaleína en 700 ml de alcohol etílico y 300 ml de agua destilada) sobre la cara interior de rodajas de 2 cm de espesor, obtenidas de las muestras retiradas del sitio de exposición. Cuando la solución entra en contacto con un medio ácido, se vuelve incolora ($\text{pH} < 8.2$) lo cual indica presencia de carbonatación. En un medio básico ($\text{pH} > 9$) adquiere un color fucsia [27]. En cada muestra, se midieron 10 diferentes puntos con respecto al borde de las rodajas obtenidas para obtener el valor promedio de profundidad de carbonatación.

Para medir la concentración de cloruros, a partir de las rodajas utilizada para medir la profundidad de carbonatación, se obtuvieron rodajas de 5 mm de espesor. Mediante perforaciones sobre la superficie de las rodajas a distancias de 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 mm con respecto al borde (como se presenta en la Figura 3-10) se extrajeron polvos, los cuales se molieron en mortero de Ágata y se tamizaron en malla #50 [119]. La determinación de cloruros solubles se realizó con respecto a la norma ASTM D1411[125].

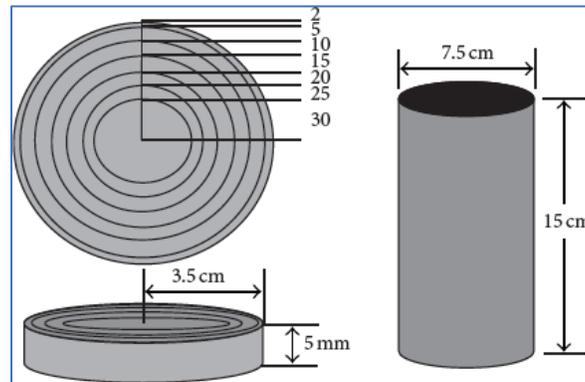


Figura 3-10 Esquema de rodajas y perforaciones requeridas para la medición de concentración de cloruros [111].

3.4 Vidrio y caliza como precursores en cementos activados por álcalis.

3.4.1 Diseño experimental y pastas preliminares.

Para el diseño experimental se usó la metodología de superficie de respuesta con un diseño central compuesto. Las variables investigadas fueron el porcentaje en peso de caliza (C) y vidrio (V), %Na₂O y el módulo del silicato de sodio ($M_s = Si_2O/Na_2O$); los niveles o valores de dichas variables se presentan en la Tabla 3-4. La variable de respuesta fue la RMC medida en pastas a diferentes edades de curado en seco y bajo agua. La distribución espacial del diseño experimental se muestra en la Figura 3-11.

Tabla 3-4 Variables y niveles experimentales considerados.

Variables	Valores usados en los experimentos
Caliza:vidrio (%wt)	0%:100%, 15%:85%, 30%:70%, 45%:55% y 60%:40%
% Na ₂ O	4%, 6%, 8%, 10% y 12%
Si ₂ O/Na ₂ O	1, 1.25, 1.5, 1.75 y 2

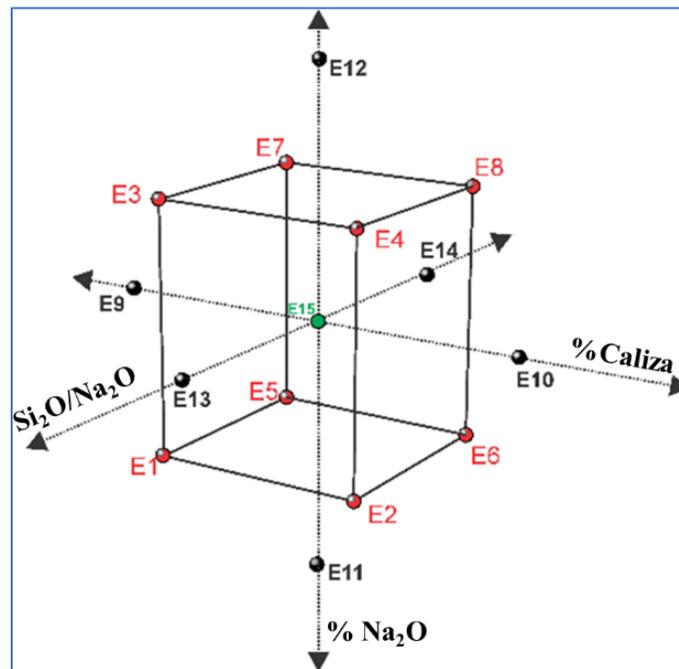


Figura 3-11 Distribución espacial del diseño experimental.

Se prepararon 17 tratamientos (Tabla 3-5) con relación a/c de 0.33 utilizando como precursores vidrio (650-700 m²/kg) y caliza (600-630 m²/kg) pulverizados. Como activador se usó una solución de silicato de sodio líquido (Na₂•SiO₃), agua y hojuelas de hidróxido de sodio (NaOH). A menor módulo Ms en el activador mayor es el pH de la solución, lo que favorece el ataque químico sobre el precursor de vidrio. También se consideró como activador cemento CPC-30R en proporción de 15% relativo a la masa de vidrio + caliza.

Tabla 3-5 Formulaciones de los tratamientos.

Pasta	Precursores		Activadores		% Na ₂ O	Si ₂ O/Na ₂ O (Ms)	a/c
	% Caliza (C)	% Vidrio (V)					
1	15	85	15%CPC-30R	Na ₂ (SiO ₃) / NaOH	6	1.25	0.33
2	45	55			6	1.25	
3	15	85			10	1.25	
4	45	55			10	1.25	
5	15	85			6	1.75	
6	45	55			6	1.75	
7	15	85			10	1.75	
8	45	55			10	1.75	
9	0	100			8	1.5	
10	60	40			8	1.5	
11	30	70			4	1.5	
12	30	70			12	1.5	
13	30	70			8	1	
14	30	70			8	2	
15	30	70			8	1.50	
16	30	70			8	1.50	
17	30	70			8	1.50	

La solución activadora fue mezclada por medio de agitación magnética durante una hora hasta disolver el NaOH. Los precursores y el cemento se pesaron según las cantidades consideradas para cada tratamiento y se homogenizaron de forma mecánica durante 2 minutos en una mezcladora con movimiento planetario. Posteriormente y durante 1 minuto se utilizó una espátula para mezclar de forma manual y evitar aglomeraciones. Finalmente se mezclaron de forma mecánica durante 2 minutos más. La solución activadora se agregó a la mezcla de precursores y se homogenizaron durante 5 minutos en la mezcladora.

La pasta obtenida se vació en moldes cúbicos de 25 mm x 25 mm x 25 mm. Después del vaciado los moldes se vibraron por 20 segundos para eliminar espacios vacíos. La superficie de los moldes se cubrió con polietileno de baja densidad y con una tela húmeda para disminuir la rapidez de evaporación del agua. Los moldes se introdujeron a una cámara de temperatura a 40°C para iniciar curado en seco. Después de 24 horas, las muestras se retiraron de los moldes y siguieron el proceso de curado en la misma cámara. Después de 21 días, la mitad de las muestras se sumergieron en agua para evaluar su carácter hidráulico a la misma temperatura de curado. La Figura 3-12 muestra un diagrama de la preparación de las pastas.

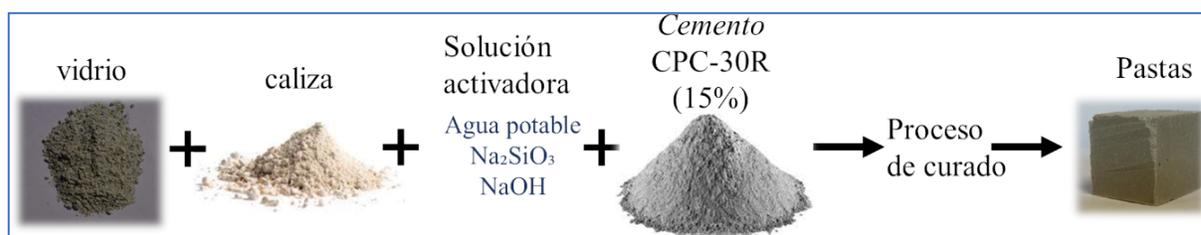


Figura 3-12 Preparación de pastas.

A cada fecha de curado de 7, 14, 28, 90, 120 y 180 días, se extrajeron aleatoriamente cuatro muestras de cada sistema para medir la RMC (Controls model 50-C7024, velocidad de carga de 300 N/s). Los resultados obtenidos a 28 días de curado en seco y a 7 días bajo agua, se analizaron mediante análisis de varianza para obtener un modelo representativo.

3.4.2 Morteros a partir de pastas óptimas.

A partir del análisis de varianza de los valores de RMC a 28 días de curado de las pastas preliminares, se propusieron como formulaciones óptimas de pastas aquellas con 0%C:100%V (9.33% Na_2O), 15%C: 85%V y 45%C:55%V y con relación a/c de 0.33. Además de la proporción de 15% de CPC-30R considerada con anterioridad, se utilizaron 5% y 25% para pastas con 45%C:55%V. Para complementar el esquema experimental, se propuso una formulación 30%C:70%V con 15% de cemento y otra con 45%C:55%V sin cemento. Se utilizó 9.33% de Na_2O en la formulación sin contenido de caliza y 8% en las

restantes. Las formulaciones óptimas y las condiciones de curado se presentan en la Tabla 3-6.

Los precursores, la solución activadora y las pastas se prepararon utilizando el procedimiento descrito en la sección 3.4.1. La superficie de los moldes se cubrió con polietileno de baja densidad y se colocó encima una tela húmeda para disminuir la rapidez de evaporación del agua. Los moldes se introdujeron a cámaras de temperatura a 40° y 20°C (Tabla 3-6). Después de 24 horas, las muestras se retiraron de los moldes y siguieron el proceso de curado en las mismas cámaras. Después de 21 días, la mitad de las muestras se sumergieron en agua para evaluar su carácter hidráulico a las temperaturas establecidas.

Tabla 3-6 Formulaciones óptimas de pastas y condiciones de curado.

<i>Pasta</i>	<i>Precursores</i>		<i>Activadores</i>		<i>% Na₂O</i>	<i>Si₂O/Na₂O (M_s)</i>	<i>a/c</i>	<i>Condiciones de curado</i>	
	<i>%C</i>	<i>%V</i>	<i>% CPC-30R</i>					<i>40°C en seco y bajo agua**</i>	<i>20°C en seco y bajo agua**</i>
PO1	0	100	15	Na ₂ (SiO ₃) / NaOH	9.33	2	0.33	X	-----
PO2	15	85	15		8			X	-----
PO3	45	55	15		8			X	X
PO4	45	55	5		8			X	X
PO5	45	55	25		8			X	X
PO6	30	70	15		8			X	X
PRef	45	55	0		8			X	X

A cada fecha de curado de 1, 3, 7, 14, 28, 90 y 120 días a 40°C en seco, se extrajeron aleatoriamente cuatro muestras de cada sistema para medir la RMC (velocidad de carga de 300 N/s); lo mismo se hizo para muestras curadas a 20°C en seco entre 1 y 90 días. Para las muestras curadas bajo agua, la RMC se midió a 7, 14 y 28 días, a 40°C y a 20°C. Polvos y fragmentos de las muestras con altos valores de RMC se caracterizaron por difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido.

A partir de los mejores resultados de RMC, se seleccionaron formulaciones para preparar morteros con proporción de 1 parte de cemento por 2.25 partes de agregado fino (1:2.25) y relación a/c de 0.35. Las pastas se prepararon utilizando el procedimiento descrito en la sección 3.4.1 considerando como agregado fino arena caliza de Coahuila. La superficie de los moldes se cubrió con polietileno de baja densidad y sobre ella se colocó una tela húmeda

para disminuir la rapidez de evaporación del agua. Las formulaciones y condiciones de curado se presentan en la Tabla 3-7. Los moldes se introdujeron a una cámara de temperatura a 40°C para iniciar curado en seco. Después de 24 horas, los morteros se retiraron de los moldes y siguieron el proceso de curado en la misma cámara. Después de 21 días, la mitad de las muestras se sumergieron en agua para evaluar su carácter hidráulico a la misma temperatura de curado. Las fechas de evaluación de la RMC fueron a 1, 3, 7, 14, 28, y 90 días para todas las muestras, y adicionalmente 120 días para las curadas en seco.

Tabla 3-7 Formulaciones utilizadas en morteros (1:2.5).

<i>Pasta</i>	<i>Precursores</i>		<i>Activadores</i>		<i>% Na₂O</i>	<i>Si₂O/Na₂O (M_s)</i>	<i>a/c</i>
	<i>%C</i>	<i>%V</i>					
MPO1	0	100	15% CPC- 30R	Na ₂ (SiO ₃) / NaOH	9.33	2	0.35
MPO2	15	85			8		
MPO6	30	70			8		
MPO3	45	55			8		

3.4.3 Pastas con activadores en polvo.

Se prepararon pastas de cemento del tipo de una parte, que son más prácticas en términos de aplicaciones en campo, con relación a/c de 0.33 utilizando vidrio y caliza como precursores. Como activadores se usaron metasilicato anhidro ($M_s=0.89$) y silicato de sodio ($M_s=2.04$ y 3.27), ambos en polvos. También se consideró como activador cemento CPC-30R en proporción de 15% relativo a la masa de vidrio + caliza. Las formulaciones y las condiciones de curado se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Formulaciones con activadores en polvo.

Pasta	Precursores		Activadores	% Na ₂ O	Si ₂ O/Na ₂ O (M _s)	a/c	Condiciones de curado en seco y bajo agua**	
	%C	%V						
PAP1	45	55	15% CPC-30R	Metasilicato anhidro	8	0.89	0.33	24 horas iniciales a 80°C y en lo sucesivo a 20°C
PAP 2				Na ₂ (SiO ₃)				20°C
PAP 2.1					40°C			
PAP 2.2					24 horas iniciales a 60°C y en lo sucesivo a 20°C			
PAP 2.3					24 horas iniciales a 80°C y en lo sucesivo a 20°C			
PAP 3				Na ₂ (SiO ₃)	3.27			

****Nota: después de 21 días de curado en seco.**

Los precursores y el activador se pesaron según las cantidades consideradas para cada formulación y se homogenizaron de forma mecánica durante 2 minutos en una mezcladora con movimiento planetario. Posteriormente y durante 1 minuto se utilizó una espátula para mezclar de forma manual y evitar aglomeraciones. Finalmente fueron mezclados de forma mecánica durante 2 minutos más. El agua considerada para cada formulación se agregó a los polvos y ambos se homogenizaron durante 5 minutos en la mezcladora. Las pastas se prepararon como se describió en la sección 3.4.1. La superficie de los moldes se cubrió con polietileno de baja densidad y sobre ella se colocó una tela húmeda para disminuir la rapidez de evaporación del agua. Los moldes ingresaron a las cámaras de temperatura según las condiciones de curado establecidas (Tabla 3-8). Después de 24 horas, las muestras se retiraron de los moldes y siguieron el proceso de curado establecido. Después de 21 días, la mitad de las muestras se sumergieron en agua para evaluar su carácter hidráulico en las mismas cámaras de temperatura. A cada fecha de curado de 1, 3, 7, 14, 28, 90 y 120 días en seco se extrajeron aleatoriamente cuatro muestras de cada sistema para medir la RMC (velocidad de carga de 300 N/s). Para las muestras curadas bajo agua, la RMC se midió a 7, 14, 28 y 90 días.

Capítulo 4. Resultados y discusión.

4.1 Concretos con acero de refuerzo embebido.

4.1.1 Resistencia mecánica a la compresión.

La Figura 4-1 presenta los resultados de ensayos de RMC realizados en concretos a diferentes edades de curado. A 28 días, los concretos con relación a/c de 0.40 y con 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio desarrollaron resistencias de 37, 34.8, 36.6 y 38.6 MPa, respectivamente. A 90 días, la RMC de la muestra de control aumentó a 44 MPa. Con respecto a este último valor, la RMC de las muestras con 5%, 10% y 15% disminuyeron 9%, 10.2% y 9.5%. Para los 270 días de curado, la muestra de control disminuyó 2.4 MPa y la RMC de las muestras con vidrio variaron alrededor de ± 2 MPa. A 360 días de curado, las muestras con 0% y 5% no presentaron cambios con respecto a 90 días. La RMC de las muestras con 10% disminuyó 3 MPa y con 15% aumentó 5 MPa. A 540 días, las RMC no mostraron cambios significativos, a excepción de los concretos con 15%, la cual disminuyó 3 MPa. Podemos observar que para la relación 0.40 el reemplazo parcial de cemento por vidrio no influye en el desarrollo de altas resistencias mecánicas.

Los concretos con relación a/c de 0.50, desarrollaron RMC de 33.8 (0%), 33.2 (5%), 32 (10%) y 35 MPa (15%) a 28 días de curado. Con respecto a estas resistencias, a 90 días de curado, los valores aumentaron 4.8%, 10.7%, 16.2% y 16.6%. Por su parte a 270 días los concretos desarrollaron 33, 37.5, 43 y 44 MPa con 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio. A 360 días de curado, no se apreciaron cambios significativos a excepción de las muestras con 10% y 15% las cuales disminuyeron a 36.5 y 40 MPa, respectivamente. Estos resultados corresponden a los reportado por Du y Tan (2017) [72], quienes obtuvieron entre 30 MPa y 60 MPa en concretos con relación a/c de 0.48 y con reemplazo de 15% de vidrio, hasta con 365 días de curado. En las muestras de concreto, a 540 días de curado, los valores de RMC se mantuvieron sin cambios significativos.

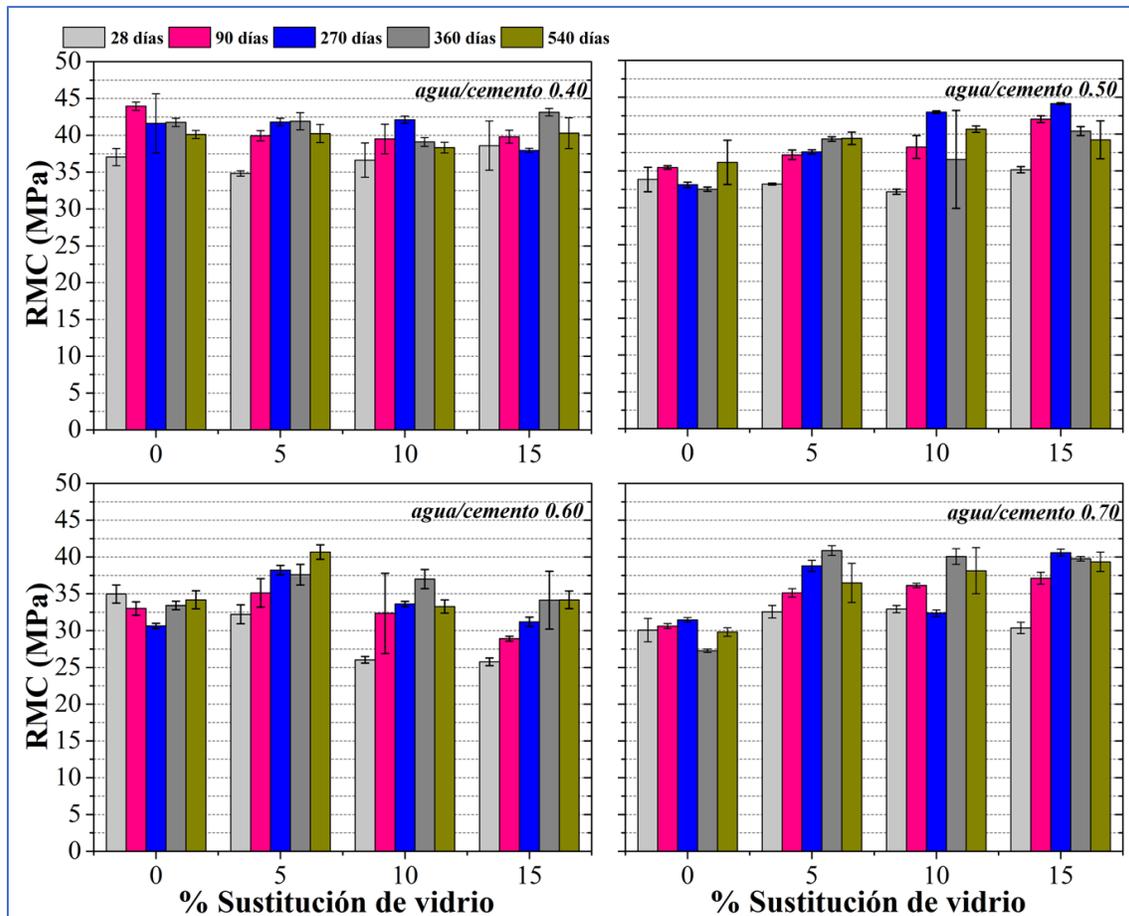


Figura 4-1 Desarrollo de resistencia mecánica a la compresión de concretos con sustitución parcial de vidrio.

Las muestras con relación a/c de 0.60 a 28 días de curado, desarrollaron: 35, 32.5, 26 y 25 MPa con 0%, 5%, 10% y 15%, respectivamente. A 90, 270, 360 y 540 días de curado los valores de RMC de las muestras con 0%, 10% y 15% no presentaron cambios significativos. Sin embargo, para estos tiempos de curado, las muestras con 5% de vidrio aumentaron 5.7%, 21%, 12.2% y 16.5% su RMC con respecto a las resistencias de sus respectivas muestras de control.

Para la relación a/c de 0.70, las muestras desarrollaron entre 30 y 33 MPa a 28 días de curado. A 90 días, la RMC de las muestras aumentaron ligeramente con respecto al porcentaje de sustitución de vidrio: 30 MPa (0%), 35 MPa (5%), 36 MPa (10%) y 37 MPa (15%). A 270 días las muestras con contenido 5%, 10% y 15% aumentaron 19.2%, 2.7% y 22.4% con respecto a su respectiva muestra de control (31.5 MPa). A 1 año de exposición, el porcentaje

de aumento fue de 33.4 (5%) y 31.7% (10% y 15%) en tanto que, para 540 días, se presentó una disminución de 17.8%, 21% y 23%.

Si bien los cambios en la RMC no son de consideración, es de notar que en los concretos con relaciones a/c de 0.50 y 0.70, a mayor tiempo de curado la RMC aumentó con respecto al porcentaje de sustitución de vidrio. A partir de 90 días, puede atribuirse que el desarrollo de resistencia se debe a la reactividad puzolánica. En el caso del vidrio, el índice de actividad puede ser evaluado con respecto a la Ecuación 6, utilizada por Elaqa y colaboradores en 2019 [127], donde se relaciona el efecto del vidrio sobre el desarrollo de RMC a diferentes edades de curado. Si el valor del índice es negativo, indica nula actividad del vidrio y decrecimiento de RMC; si el valor es cero no hay cambio de RMC entre las muestras de control y con vidrio; y si el valor es positivo indica reactividad y efecto del vidrio sobre el desarrollo de RMC.

$$\text{Índice de actividad} = 1 - \frac{\text{RMC muestras de control} \times \% \text{ de vidrio}}{\text{RMC muestras con vidrio} \times 100} \quad (6)$$

La Tabla 4-1 contiene los índices de actividad de los concretos con edades de curado desde 28 y hasta 540 días. Puede observarse que para todas las edades de curado los índices son mayores que cero, lo que indica efecto positivo del vidrio sobre el desarrollo de resistencia mecánica a la compresión.

Tabla 4-1 Índice de actividad (%) de los concretos con contenido de vidrio.

a/c	% vidrio	Índice de actividad (%)				
		días de curado				
		28	90	270	360	540
0.40	5	0.95	0.94	0.95	0.95	0.95
	10	0.90	0.89	0.90	0.89	0.90
	15	0.86	0.83	0.84	0.85	0.85
0.50	5	0.95	0.95	0.96	0.96	0.95
	10	0.89	0.91	0.92	0.91	0.91
	15	0.86	0.87	0.89	0.88	0.86
0.60	5	0.95	0.95	0.96	0.96	0.96
	10	0.87	0.90	0.91	0.91	0.90
	15	0.80	0.83	0.85	0.85	0.85
0.70	5	0.95	0.96	0.96	0.97	0.96
	10	0.91	0.92	0.90	0.93	0.92
	15	0.85	0.88	0.88	0.90	0.89

4.1.2 Profundidad de carbonatación.

La Figura 4-2 presenta el desarrollo de la profundidad de carbonatación en concretos con relaciones $a/c = 0.40, 0.50, 0.60$ y 0.70 , con 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio, expuestos en ambiente marino hasta 48 meses. Para la relación a/c de 0.40, las profundidades de carbonatación en las muestras sin contenido de vidrio fueron menores a 2 mm durante todo el periodo de exposición. Por su parte, las muestras con 5%, 10% y 15% presentaron profundidades menores a 2 mm, hasta 24 meses. Para los 30 meses de exposición, las muestras con sustitución de vidrio presentaron valores de 8 mm (5%), 4 mm (10%) y 3 mm (15%), respectivamente. Mientras que, a los 42 meses, las muestras con 10% y 15% no presentaron cambios. Sin embargo, las muestras con 5% presentaron una disminución en la profundidad de carbonatación. Esto podría deberse a la presencia de algún fragmento de agregado grueso en las zonas de las mediciones del perfil carbonatado, el cual puede interferir en la revelación de carbonatación al ser aplicada la fenolftaleína. A 48 meses de exposición, las profundidades de carbonatación fueron de 11 mm, 8 mm y 7.5 mm en concretos con 5%,

10% y 15%. Estos valores no son de consideración con respecto a la corrosión del acero de refuerzo, ya que la máxima profundidad medida (11 mm con 5% de vidrio) es alrededor de una tercera parte de la distancia en la que se ubica el acero de refuerzo embebido con respecto al borde (32.5 mm).

En los concretos con relación a/c de 0.50, las profundidades de carbonatación de todas las muestras se ubicaron entre 2 mm y 4 mm, a 24 meses de exposición. Las profundidades fueron aumentando con respecto al tiempo por lo que, a 42 meses, los valores fueron de 8 mm (0%), 3.5 mm (5%), 6 mm (10%) y 9 mm (15%). A 48 meses de exposición las profundidades de carbonatación obtenidas fueron de 9.5 mm (0%), 8 mm (5%), 10.5 mm (10%) y 6.5 mm (15%). La disminución de la profundidad en las muestras de 15% puede deberse, como se mencionó en el párrafo anterior, a la presencia de fragmentos de agregado grueso en la zona de medición. Las profundidades a 48 meses siguen siendo menores con respecto a la posición del acero embebido (32.5 mm).

Con respecto a la relación a/c de 0.60, los concretos presentaron profundidades de carbonatación de 5.7 mm (0%), 4 mm (5%), 8 mm (10%) y 11.6 mm (15%) a 24 meses de exposición. Las profundidades fueron incrementando con respecto al tiempo; a 48 meses, las profundidades de carbonatación medidas fueron de 12 mm (0%), 7 mm (5%), 13.5 mm (10%) y 19.5 mm (15%). Este último valor es de consideración puesto que la zona carbonatada se encuentra a 15 mm del acero de refuerzo. Por otro lado, la menor profundidad de carbonatación obtenida fue en concretos con 5% de vidrio.

En los concretos con relación a/c de 0.70, las profundidades se ubicaron entre 6 y 9 mm a 24 meses de exposición. Entre 24 y 30 meses se registra un ligero aumento (entre 1 y 3 mm), pero entre 30 y 42 meses, no se registraron cambios significativos. Sin embargo, a los 48 meses, las profundidades de las muestras fueron: 9.5 mm (0%), 9 mm (5%), 15 mm (10%) y 16 mm (15%). Al igual que en los concretos con relación a/c de 0.50 y 0.60, las muestras con 5% presentaron las menores profundidades de carbonatación aún a 48 meses de exposición.

De manera general, las profundidades de carbonatación en todas las muestras de concreto estuvieron por debajo de 25 mm aún después de 48 meses de exposición. Los resultados obtenidos en las muestras con relaciones a/c de 0.40 y 0.50 también corresponden con lo reportado por Rao y Meena en 2017 [128], quienes mencionan que la profundidad de

carbonatación incrementa al aumentar la relación a/c y disminuye cuando esta es reducida. Lo mismo sucede con respecto a la porosidad, permitiendo un mayor ingreso de CO₂ de la atmosfera al interior del concreto. Esto puede observarse en las profundidades de carbonatación medidas en las muestras de control con relaciones a/c de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70, con 48 meses de exposición: 1.5, 9.5, 12 y 9.5 mm (Tabla 4-2). También es de notar, que 5% de sustitución parcial de cemento por vidrio en concretos preparados con agregados fino y grueso de tipo caliza, es una proporción óptima para disminuir la profundidad de carbonatación.

Tabla 4-2 Profundidades de carbonatación a 48 meses de exposición.

a/c	Profundidades de carbonatación (mm)			
	Reemplazo parcial de vidrio			
	0%	5%	10%	15%
0.40	1.5	11	8	7.5
0.50	9.5	8	10.5	6.5
0.60	12	7.5	13.5	19.5
0.70	9.5	9	15	16

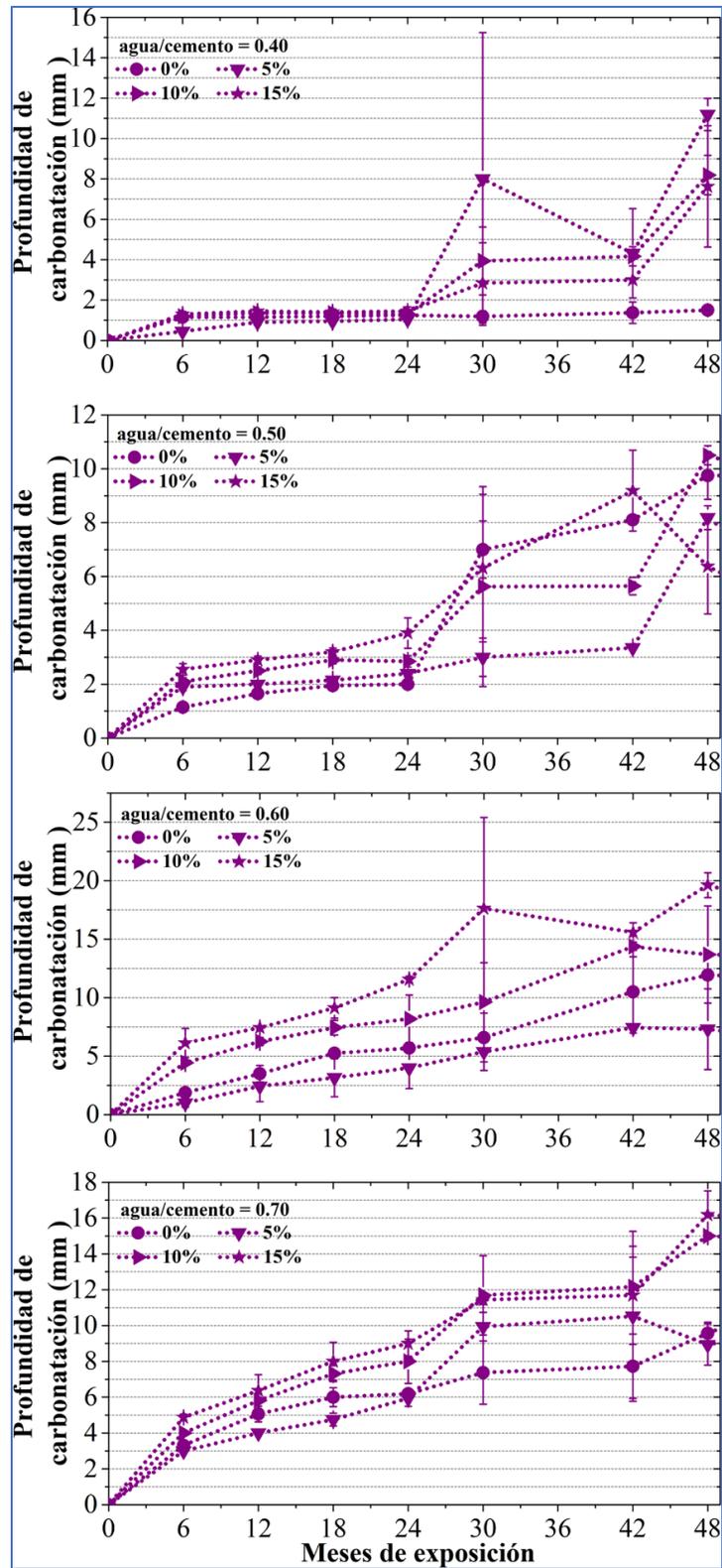


Figura 4-2 Desarrollo de la profundidad de carbonatación en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.

4.1.3 Concentración de cloruros.

La Figura 4-3 presenta la concentración promedio de cloruros como porcentaje en peso de material cementante (ppmc) determinados en polvos obtenidos de concretos ($a/c=0.40, 0.50, 0.60$ y 0.70) con y sin contenido de vidrio, expuestos a ambiente marino hasta por 48 meses. El umbral de cloruros considerado en este trabajo es de 0.4 ppmc a 1.2 ppmc, el cual ha sido reportado en otros trabajos realizados en la península de Yucatán [111,112].

En los concretos con relación a/c de 0.40 , las muestras sin contenido de vidrio presentaron concentraciones dentro del umbral (0.45 ppmc) a partir de los 18 meses. Las concentraciones de las muestras con contenido de vidrio se mantuvieron fuera del umbral a 24 y 30 meses de exposición. A 42 meses la concentración de cloruros de las muestras con 5% de vidrio ingresaron al umbral (0.5 ppmc). A 48 meses de exposición, las concentraciones fueron de 0.9 ppmc para las muestras con 0% y 5%, y de 0.6 ppmc para las muestras con 10%. Cabe señalar que las concentraciones de los concretos con 15% de vidrio, se mantuvieron a lo largo del tiempo de exposición por debajo del umbral de cloruros (0.2 ppmc).

Con respecto a los concretos con relación a/c de 0.50 , las muestras de control presentaron concentraciones de cloruros con valores dentro del umbral a partir de 12 meses de exposición y fueron en incremento hasta 2.2 ppmc a 48 meses. Para este mismo tiempo de exposición, las muestras con 5% y 10% presentaron concentraciones dentro del umbral de 1.2 y 1 ppmc, respectivamente. Así como en la relación a/c de 0.40 , las concentraciones de cloruros en las muestras con 15%, fueron inferiores al umbral (0.3 ppmc).

En concretos con relación a/c de 0.60 , las muestras de control presentaron concentraciones dentro del umbral desde los 6 meses de exposición. A 24 meses, todas las muestras presentaron concentraciones dentro del umbral: 1.2 ppmc (0%), 0.5 ppmc (5%), 0.6 ppmc (10%) y 0.4 ppmc (15%). A 2 años de exposición, las concentraciones de las muestras con 0%, 5% y 10% superaron el umbral: $2.7, 1.8$ y 1.5 ppmc. Por su parte, en las muestras con 15% de vidrio, la concentración fue de 1.1 ppmc.

Por último, los concretos con relación a/c de 0.70 sin contenido de vidrio (0%) presentaron concentración de cloruros dentro del umbral (0.9 ppmc) desde los 6 meses, la cual se

incrementó a 3.4 ppmc a 48 meses de exposición. Por otro lado, en los concretos con contenido de vidrio, la concentración de cloruros se mantuvo por debajo del umbral (0.4 ppmc) hasta los 18 meses. Sin embargo, 12 meses después, las concentraciones incrementaron a 1.9 (0%), 1.2 (5%), 0.4 (10%) y 0.5 (15%). A los 48 meses, los valores anteriores se incrementaron en promedio 1.9 veces.

De manera general puede apreciarse que las muestras de control (0%) de concretos con relaciones a/c de 0.50, 0.60 y 0.70 presentaron altas concentraciones de cloruros a 48 meses de exposición (2.2, 2.7 y 3.4 ppmc, respectivamente), en comparación con la relación de 0.40 (0.9 ppmc). Esto corresponde con el diseño de mezcla (sección 3.2.1, Tabla 3-3), ya que esta relación tiene mayor contenido de cemento (216 kg), lo que contribuye a disminuir la presencia de poros internos. En los concretos con relación de 0.70, la alta concentración de cloruros corresponde con lo reportado por Castro en 2013 [111], quien expuso muestras de concreto (con 7 días de curado) en condiciones similares; clima marino tropical, alta humedad y temperaturas promedio entre 26 y 30°C, en las cuales registró 6 ppmc, a 45 meses de exposición.

En el caso de los concretos con contenido de vidrio, es visible el efecto del reemplazo parcial, ya que las concentraciones de cloruros fueron menores en comparación con las obtenidas en las muestras de control. Esto puede relacionarse con el tamaño de partícula utilizado, ya que la matriz del concreto puede densificarse, dependiendo de la proporción de sustitución, cuando las partículas son menores a 100 μm [75,76]. En este trabajo el tamaño promedio de las partículas de vidrio utilizado como reemplazo parcial fue de entre 23 y 26 μm .

También a 48 meses de exposición, las muestras con contenido de 15% de vidrio y con relaciones a/c de 0.40 y 0.50 presentaron concentraciones por debajo del umbral (0.2 y 0.3 ppmc, respectivamente) lo cual puede deberse al decrecimiento de los poros y de la conectividad entre ellos. Esto limita el transporte de cloruros, como reportó He y colaboradores [69]. Incluso aún si los concretos con contenido de vidrio presenta resistencias mecánicas a la compresión menores que las muestras de control (0% vidrio), los primeros presentarán una fuerte resistencia a la penetración de cloruros.

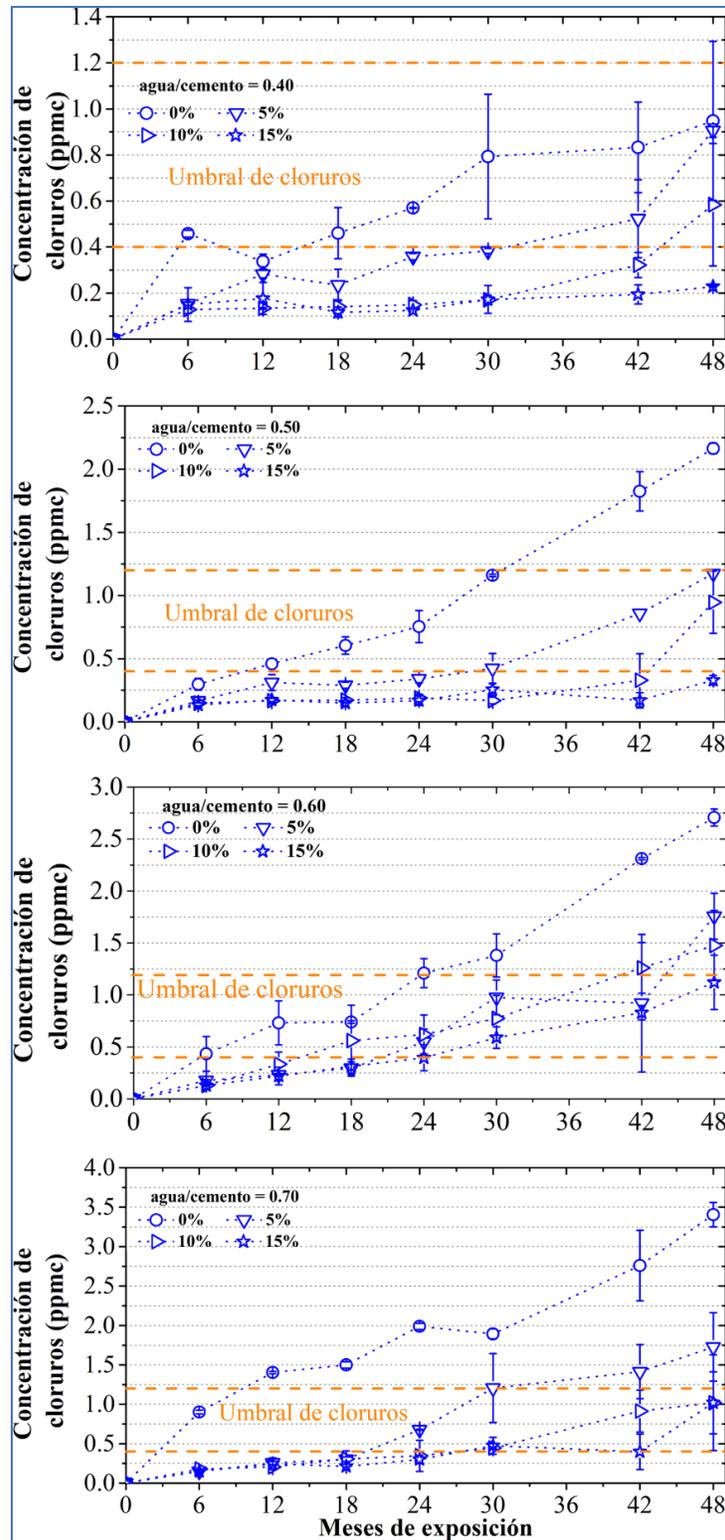


Figura 4-3 Concentración de cloruros en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.

De los datos de densidad de corriente de corrosión y concentración de cloruros podemos concluir que la sustitución de 5% de polvo de vidrio reciclado es la proporción óptima pues retarda el inicio de corrosión en el acero de refuerzo en aproximadamente 12 y 24 meses (con respecto a las muestras de control) en las relaciones de 0.40 y 0.50, respectivamente. El criterio de inicio de corrosión fue considerando el valor de 0.1 microamperios/cm² considerado en la literatura, el cual corresponde a una pérdida del espesor del acero de a micrómetro/año.

4.1.4 Potencial de corrosión.

La Figura 4-4 presenta los resultados de E_{corr} medidos en el acero de refuerzo embebido en concretos con 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio, con hasta 48 meses de exposición. Como se indicó en la sección 2.14.1, los valores de potenciales equivalentes vs SCE, considerados en este trabajo fueron: valores más positivos que -140 mV, 90% de probabilidad de nula actividad de corrosión; entre -140mV y -290 mV, actividad de corrosión incierta; y valores más negativos que -290 mV, 90% de probabilidad de actividad de corrosión.

En concretos con relación a/c de 0.40 y con 18 meses de exposición, los valores de E_{corr} obtenidos en los aceros embebidos en todas las muestras fue menor a -140 mV, lo que indica alta probabilidad de nula actividad de corrosión en el acero de refuerzo. A 42 meses, los potenciales de todas las muestras indicaron actividad de corrosión incierta y a 48 meses, los potenciales del acero embebido en concretos con contenido de vidrio se ubicaron en la región de actividad de corrosión incierta. Por su parte, el potencial en las muestras de control fue de -368.4 mV, lo cual indica una muy alta probabilidad de actividad de corrosión).

En el caso de los concretos con relación a/c de 0.50, a 42 meses los aceros de las muestras con 5%, 10% y 15% de vidrio presentaron potenciales que indicaban 90% de probabilidad de nula actividad de corrosión en el acero de refuerzo. A partir de los 12 meses, el potencial de las muestras sin contenido de vidrio fue de -150 mV (región de actividad incierta) y fue haciéndose más negativo con respecto al tiempo hasta llegar el valor de -367.6 mV (muy alta probabilidad de actividad de corrosión) a 48 meses de exposición. Para este mismo tiempo, los potenciales de las muestras con 10% y 15% de vidrio permanecieron en la región de nula

actividad de corrosión (99.5 mV y 83.4 mV). Por su parte las muestras con 5% presentaron potencial correspondiente a la región de actividad de corrosión incierta (-157 mV).

En los concretos con relación a/c de 0.60, a 3 meses de exposición, el potencial de los concretos con 15% de vidrio ingreso a la región de actividad de corrosión incierta (-201 mV). El potencial de las muestras de control ingreso a esta misma región a los 15 meses, mientras que los potenciales de los concretos con 5% y 10% de sustitución fueron de -78 y -94 mV (alta probabilidad de nula corrosión). A los 27 meses, los potenciales de los concretos sin contenido de vidrio, con 10% y 15%, ingresaron a la región de 90% de probabilidad de actividad de corrosión en el acero del refuerzo con potenciales de: -372, -352 y -360 mV, respectivamente. El potencial de las muestras con 5% ingresaron a la región de actividad de corrosión incierta (-142 mV). A los 42 meses de exposición, los potenciales de las muestras de control y con sustitución de 10% y 15%, se vuelven positivos en hasta 250 mV. Este comportamiento pudo deberse a la falta de humedad en las muestras de concreto al momento de realizar la medición. A 48 meses, todos los potenciales de las muestras se ubicaron en el inicio de la región de alta probabilidad de corrosión.

Por último, los concretos con relación a/c de 0.70 y sin contenido de vidrio, presentaron potencial dentro de la región de actividad incierta de corrosión desde los 3 meses de exposición (-190.8 mV). A los 6 meses el potencial registrado fue de -300 mV, ingresando a la región de 90% de probabilidad de actividad de corrosión. Los concretos con 5%, 10% y 15% de vidrio presentaron potenciales por debajo de -100 mV, 90% de probabilidad de nula actividad de corrosión, hasta los 21 meses. Entre los 35 y 42 meses, de nueva cuenta puede observarse aumento y decremento en los potenciales de las muestras con 5%, 10% y 15%, como sucedió con los potenciales medidos en las muestras de relación a/c de 0.60 a 42 meses. Como se mencionó en el párrafo anterior, este comportamiento pudo deberse a la falta de humedad en las muestras de concreto al momento de realizar la medición. A 48 meses, los potenciales de las muestras con contenido de vidrio mostraron tendencia de nuevo hacia la región de alta probabilidad de corrosión. Estas muestras son de especial interés ya que, en varias regiones de países en desarrollo, se practica la autoconstrucción sin cumplir con normatividad, lo que conlleva muchas veces a exceder la cantidad de agua en la mezcla de concreto con el objetivo de evitar su prematuro fraguado.

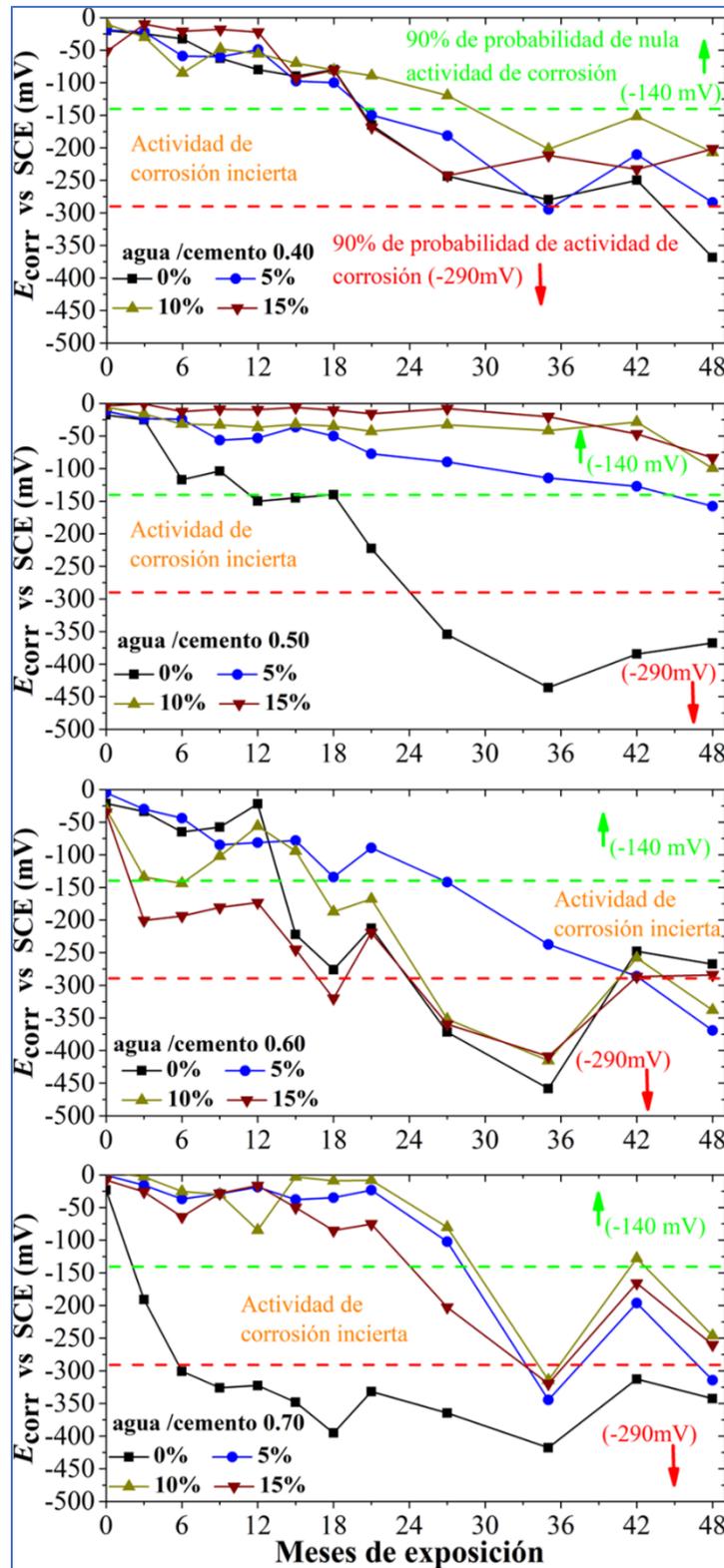


Figura 4-4 Potenciales de corrosión en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.

De manera general, los potenciales de corrosión medidos en el acero de refuerzo embebido en concretos con relaciones a/c de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70, corresponden de manera directa con los valores de concentración de cloruros obtenidos en la sección anterior. Además, se nota un efecto positivo del reemplazo parcial de vidrio en comparación con las muestras de control, con respecto a los potenciales desarrollados en los concretos con relación de 0.50 y 0.70. A los 48 meses de exposición, el potencial medido en concretos con contenido de vidrio y relación a/c de 0.40, correspondió a la región de actividad de corrosión incierta. En el caso de la relación de 0.50, los potenciales indicaron nula actividad de corrosión en el acero de refuerzo con respecto a las muestras de control. Se observa una relación directa entre el desarrollo de los potenciales y el porcentaje de sustitución de vidrio. Mayor contenido de vidrio resulta en valores de potenciales de corrosión más positivos, lo cual significa una alta probabilidad de que no esté ocurriendo corrosión. Esto corresponde con lo reportado por Peng y colaboradores (2023) [129] quienes mencionan que el bajo riesgo de corrosión en muestras con contenido de vidrio desde 10% y hasta 40% de vidrio es causado por el refinamiento del tamaño de poros debido a la reacción puzolánica del vidrio.

Los potenciales de corrosión medidos en el acero de refuerzo embebido están directamente relacionados con En la Tabla 4-3, se presentan las concentraciones de cloruros obtenidas en los concretos con y sin contenidos de vidrio y los tiempos en los cuales los potenciales de corrosión dejaron de tener un 90% de probabilidad de nula actividad de corrosión (< -140 mV, región de actividad de corrosión incierta). Puede observarse que los concretos con reemplazos de 5% y 10% pueden considerarse como proporciones óptimas, ya que pueden extender el tiempo en el cual el acero desarrollará potenciales que puedan indicar presencia de corrosión.

Tabla 4-3 Concentraciones de cloruros con respecto al tiempo en el cual los potenciales ingresaron a la región de actividad de corrosión incierta (< -140 mV).

a/c	0%		5%		10%		15%	
	ppmc	Tiempo (meses)						
0.40	0.5	21	0.4	27	0.2	30	0.1	21
0.50	0.4	12	1.2	48	----	-----	----	----
0.60	0.7	15	1.2	30	0.5	18	0.1	3
0.70	0.4	3	1.2	30	0.4	30	0.3	24

Por último, cabe hacer mención, que como hemos visto en los datos de profundidad de carbonatación, hay un avance de este, aunque de pocos milímetros, pero existe una zona carbonatada en la superficie del concreto la cual impide la medición correcta de los potenciales de corrosión, el cual ya no es confiable. La norma ASTM 876 [113] previene de esta situación, indicando realizar mediciones en concretos libres de carbonatación. No obstante, los resultados de potenciales de corrosión son presentados para observar la evolución de ese potencial como referencia.

4.1.5 Densidad de corriente de corrosión.

La Figura 4-5 presenta los resultados de *icorr* obtenidos a partir de las mediciones de resistencia a la polarización realizados en el acero de refuerzo embebido en concretos con 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio, con hasta 48 meses de exposición. Como se mencionó en la sección 2.14.2, las condiciones que pueden presentarse son: valores menores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($< 1 \mu\text{m}/\text{año}$), condición pasiva del acero de refuerzo o riesgo de corrosión despreciable; entre $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (entre $1 \mu\text{m}/\text{año}$ y $5.8 \mu\text{m}/\text{año}$), de baja a moderada corrosión; entre $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (entre $5.8 \mu\text{m}/\text{año}$ y $11.6 \mu\text{m}/\text{año}$), de moderada a alta corrosión; y superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, alta corrosión (mayor a $11.6 \mu\text{m}/\text{año}$).

En los concretos con relación *a/c* de 0.40, los valores de *icorr* correspondieron a las regiones de condición pasiva y de baja a moderada corrosión, hasta los 21 meses de exposición. A los 35 meses, el valor de *icorr* de la muestra con 15% de vidrio ingresó a la región de baja a moderada corrosión. A 35 meses, las densidades de corriente de corrosión medidas en el acero del refuerzo en los concretos con 0, 5, 10 y 15% fueron de $1.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (alta corrosión), $0.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (de moderada a alta corrosión), $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente. A los 48 meses, los valores de *icorr* con 0%, 5% y 10% de vidrio aumentaron a $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectivamente. En las muestras con 15% la densidad de corriente de corrosión se mantuvo en la región de condición pasiva. Es posible notar a 4 años, que existe un efecto benéfico con respecto a la proporción de reemplazo, ya que a mayor proporción de vidrio menor densidad de corriente de corrosión.

En las muestras con relación *a/c* de 0.50, el valor de *icorr* de las muestras de control fue de $0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (moderada a alta corrosión) desde los 27 meses y fue en incremento hasta llegar a un máximo de $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (alta corrosión) a los 42 meses de exposición. Las muestras con 10 y 15% presentaron densidades de corriente de corrosión entre las regiones de condición pasiva y de baja a moderada corrosión, durante todo el tiempo de exposición. Por su parte, en las muestras con 5% de vidrio, el valor de *icorr* de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (baja a moderada corrosión) medido a 42 meses, incrementó a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (moderada a alta corrosión) a los 48 meses de exposición.

En las muestras con relación a/c de 0.60, los valores de densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) medidos en los aceros de refuerzo de los concretos con 0%, 10% y 15% de vidrio, oscilaron entre las regiones de condición pasiva y de baja a moderada corrosión hasta los 21 meses de exposición. A partir de 27 meses, los valores de i_{corr} en concretos con 15% de vidrio aumentó a $3.4 \mu A/cm^2$ permaneciendo en la región de alta corrosión hasta los 48 meses. A partir de los 35 meses, los valores de i_{corr} de las muestras con 0, 10 y 15% fueron de $5 \mu A/cm^2$, $2.6 \mu A/cm^2$ y $1 \mu A/cm^2$. Por otro lado, en las muestras con 5% de vidrio, los valores de i_{corr} permanecieron en la región de condición pasiva desde los 0 y hasta los 42 meses, lo cual indica un riesgo de corrosión despreciable en el acero de refuerzo. A los 48 meses, las densidades de corriente de corrosión medidos en las muestras con 0, 5, 10 y 15% de vidrio fueron de 3.8, 0.8, 2.8 y $1.7 \mu A/cm^2$, respectivamente.

Por último, en los concretos con relación a/c de 0.70, las muestras sin contenido de vidrio presentaron valores de i_{corr} correspondientes a la región de moderada a alta corrosión desde los 6 meses. Los valores de i_{corr} se fueron incrementando hasta un máximo de $5.8 \mu A/cm^2$ a los 48 meses de exposición. Por su parte, las densidades de corriente de corrosión de las muestras con contenido de vidrio oscilaron entre la región de condición pasiva y la de baja a moderada corrosión hasta los 27 meses, ya que, a partir de los 35 meses los valores de i_{corr} aumentaron e ingresaron a la región de moderada a alta corrosión.

Podemos observar de manera general, que las densidades de corriente de corrosión obtenidas corresponden con los potenciales de corrosión descritos en la sección anterior. Considerando las densidades de corriente de corrosión en términos de pérdida de espesor, a 48 meses de exposición, los valores en los concretos sin contenido de vidrio para las relaciones a/c de 0.40, 0.50, 0.60 y 0.70 son: 23, 30, 44 y $67 \mu m/año$, respectivamente. En el mismo orden de relaciones a/c, pero en los concretos con contenido de vidrio, las menores pérdidas de espesor en el acero de refuerzo fueron de: $0.8 \mu m/año$ (a/c=0.40, 15%), $0.6 \mu m/año$ (a/c=0.50, 15%), $9.7 \mu m/año$ (a/c=0.60, 5%) y $9 \mu m/año$ (a/c=0.70, 10 y 15%). Es notable el efecto benéfico de la sustitución parcial de cemento por vidrio, sobre todo en la relación a/c de 0.70, a pesar de que, por la naturaleza de la mezcla y en condiciones estándares de preparación, se espera que contenga más poros internos.

En la Tabla 4-4 se presentan las densidades de corriente de corrosión y los tiempos en los cuales los valores son iguales o mayores a $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($1 \mu\text{m}/\text{año}$), por lo cual el acero de refuerzo embebido pierde su condición pasiva. Puede observarse que en los concretos con relación a/c de 0.40 y con 5% de vidrio los valores de icorr del acero de refuerzo perdieron su condición pasiva hasta los 30 meses. Con 10 y 15% de vidrio, fue hasta los 24 y 25 meses, respectivamente. En la relación a/c de 0.50, con 5% de vidrio el valor de icorr fue de 0.1 hasta los 35 meses.

Tabla 4-4 Valores de densidades de corriente de corrosión y tiempos en los que se pierde la condición pasiva en el acero de refuerzo ($\geq 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

a/c	0%		5%		10%		15%	
	Icorr $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	tiempo (meses)	Icorr $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	tiempo (meses)	Icorr $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	tiempo (meses)	Icorr $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	tiempo (meses)
0.40	0.1	18	0.4	30	0.1	24	0.2	25
0.50	0.1	12	0.1	35	0.1	12	0.1	18
0.60	0.3	15	0.1	15	0.2	18	0.5	3
0.70	0.3	3	0.2	9	0.2	6	0.2	3

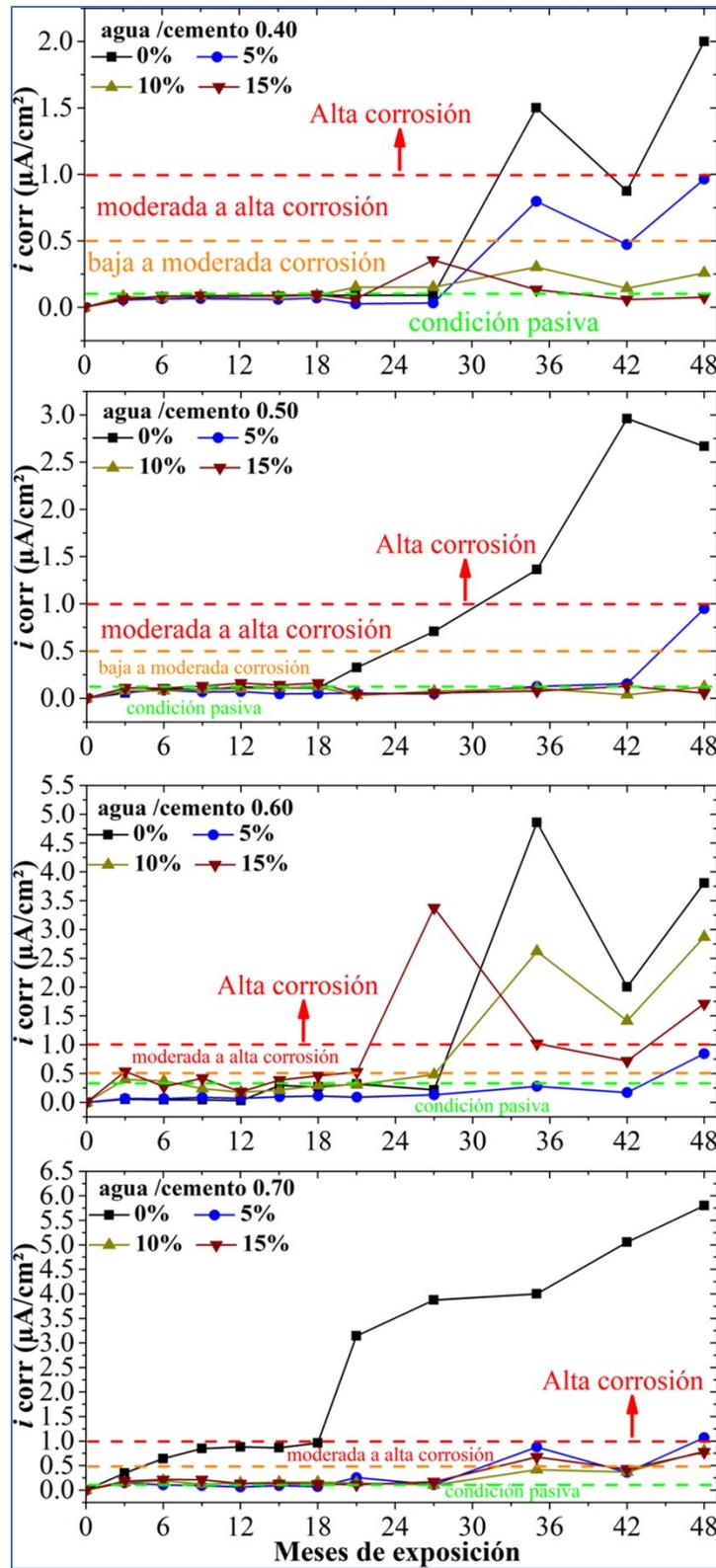


Figura 4-5 Densidades de corriente de corrosión en concretos con sustitución parcial de vidrio expuestos por 48 meses.

4.2 Vidrio y caliza como precursores en cementos activados por álcalis.

4.2.1 Diseño experimental y pastas preliminares.

La Figura 4-6 presenta los resultados de RMC de las pastas preliminares a 7, 14 y 28 días de curado en seco y bajo agua a 40°C. En la Tabla 4-5 y Tabla 4-7 se presentan los valores de RMC obtenidos para ambos tipos de curado.

Como puede observarse, a todas las edades y por ambos métodos de curado, las pastas con un reemplazo total de cemento por vidrio (pasta 9) obtuvieron los mejores resultados de RMC. A 7, 14 y 28 días de curado en seco, las resistencias alcanzadas fueron de 73.6, 107.5 y 106.4 MPa, respectivamente. En el caso de los reemplazos parciales, aquellas pastas que contienen mayor cantidad de vidrio (pasta 1, 3, 5 y 7), presentaron un mejor comportamiento de RMC comparadas con las que presentaron mayor contenido de caliza (pastas 2, 4 y 6), lo cual comprueba que la actividad puzolánica del vidrio aumenta la RMC en este tipo de pastas [130,131].

Por otro lado, aun cuando ambos sistemas de curado generan muestras con RMC considerables, las pastas que tuvieron un curado en seco desarrollaron un desempeño mucho mejor a través del tiempo que aquellas que fueron sometidas a curado bajo agua, ya que en este último sistema la RMC decrece con respecto a los días de curado, obteniéndose valores menores a 43 MPa a 28 días, caso contrario a los sistemas curados en seco. Esto sugiere que el curado en seco influye significativamente en como las partículas de vidrio, se incorporan en la matriz de las pastas para densificarla [130,131]. Del análisis de varianza realizado sobre los resultados de RMC, como se mencionó en la sección 3.4.1, se obtuvieron los modelos matemáticos, contenidos en la Tabla 4-6, para modelar la RMC a 28 días de curado en seco y bajo agua.

Pasta	Formulación	Pasta	Formulación	Pasta	Formulación
1	15%C, 85%V, 6%NaO ₂ , Ms 1.25	7	15%C, 85%V, 10%NaO ₂ , Ms 1.75	13	30%C, 70%V, 8%NaO ₂ , Ms 1
2	45%C, 55%V, 6%NaO ₂ , Ms 1.25	8	45%C, 55%V, 10%NaO ₂ , Ms 1.75	14	30%C, 70%V, 8%NaO ₂ , Ms 2
3	15%C, 85%V, 10%NaO ₂ , Ms 1.25	9	0%C, 100%V, 8%NaO ₂ , Ms 1.50	15	30%C, 70%V, 8%NaO ₂ , Ms 1.50
4	45%C, 55%V, 10%NaO ₂ , Ms 1.25	10	60%C, 40%V, 8%NaO ₂ , Ms 1.50	16	30%C, 70%V, 8%NaO ₂ , Ms 1.50
5	15%C, 85%V, 6%NaO ₂ , Ms 1.75	11	30%C, 70%V, 4%NaO ₂ , Ms 1.50	17	30%C, 70%V, 8%NaO ₂ , Ms 1.50
6	45%C, 55%V, 6%NaO ₂ , Ms 1.75	12	30%C, 70%V, 12%NaO ₂ , Ms 1.50		

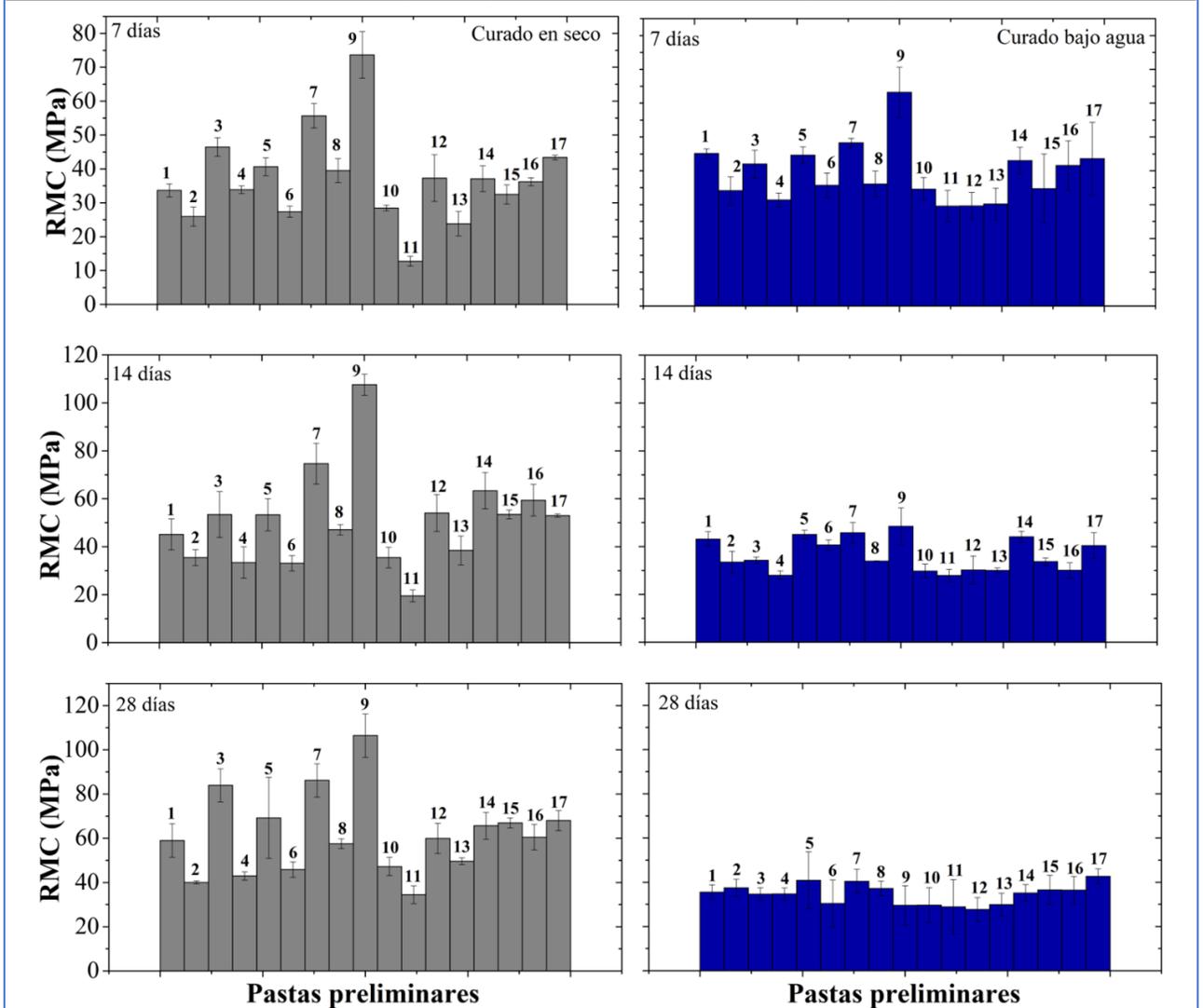


Figura 4-6 Resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares curadas en seco y bajo agua a 7, 14 y 28 días.

Tabla 4-5 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares, curadas en seco a 40°C.

Pasta	Formulaciones				Promedio resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar											
	%C	%V	%NaO ₂	Ms	7d		14d		28d		90d		120d		180d	
1	15	85	6	1.25	33.6	2	45	6.4	59	7.6	80.2	6	74.2	3.4	78.5	7.5
2	45	55	6	1.25	26	2.8	35.4	3.3	40	0.7	57.7	3	55	3	56.3	3.5
3	15	85	10	1.25	46.5	2.7	53.4	9.6	84	7.4	89	16	81	9	87	9.8
4	45	55	10	1.25	33.8	1.1	33.4	6.5	43	2	68	6.3	57.7	4	69.5	11
5	15	85	6	1.75	40.6	2.6	53.3	7	69.2	18.3	77	4	81.2	5.8	86	11.4
6	45	55	6	1.75	27.3	1.6	33	3.2	45.8	3.5	57.2	6	56.6	4.6	61.2	4.5
7	15	85	10	1.75	55.7	3.6	74.6	8.5	86.2	7.5	97.3	8.7	83.4	12.7	83	11.2
8	45	55	10	1.75	39.5	3.5	47	2.1	57.5	2	72.3	5.4	80	14.8	91.2	1.8
9	0	100	8	1.50	73.6	6.8	107.5	4.4	106.4	9.7	107.3	9.5	131	8.8	133	20.3
10	60	40	8	1.50	28.4	0.8	35.4	4.3	47.2	4	58.4	2.4	55	7	65.3	11.4
11	30	70	4	1.50	12.7	1.4	19.5	2.5	34.4	4	49.4	3.5	29.8	3.6	41.8	10
12	30	70	12	1.50	37.3	6.8	54	7.7	60	7	71.7	4.8	45.6	7	76	4
13	30	70	8	1	23.8	3.6	38.5	6	49.6	1.6	56.4	5.3	56	6.5	69	8
14	30	70	8	2	37	3.8	63.3	7.6	65.6	6	82.3	11.4	69	7.4	70.8	5.5
15	30	70	8	1.50	32.5	2.8	53.5	1.8	67	2.3	77.4	16.8	70	4.2	93.7	9.8
16	30	70	8	1.50	36	1	59.4	6.5	60.5	5.7	68.7	15.2	61.7	2	69.6	11
17	30	70	8	1.50	43.4	0.7	53	0.7	68	4.45	68.2	13.8	43.6	3.2	79.2	7

También fue comparado el efecto del módulo de silicio (M_s) y el $\%Na_2O$ sobre el desarrollo de RMC a 28 días de curado (Figura 4-7). Las pastas con módulos de silicio de 1.5 (pasta 15) y 2 (pasta 14) desarrollaron altos valores de RMC (67 y 65.6 MPa, respectivamente) con respecto al módulo de 1 (que es más alcalina y tiene menos SiO_2). El mismo comportamiento ocurrió en el caso de las pastas con $8\%Na_2O$ (pasta 15) y $12\%Na_2O$ (pasta 12); desarrollando 60 y 67 MPa, respectivamente. La concentración de Na_2O tiene influencia en el desarrollo de resistencia mecánica, ya que altas proporciones promueven la disolución del vidrio [132].

En la Figura 4-8 puede observarse el efecto de los factores antes mencionados y el efecto del contenido de vidrio sobre la RMC a 28 días de curado en seco y bajo agua. En las muestras curadas en seco, el bajo contenido de caliza (alto contenido de vidrio) tiene un efecto directo en el desarrollo de altas resistencias mecánicas. Es de notar que la mejor cantidad de activador

es 8%Na₂O y no hay una diferencia significativa entre los módulos de 1.5 y de 2. Las observaciones para las muestras curadas bajo agua son similares respecto al contenido de caliza y de %Na₂O; sin embargo, la RMC aumentó con respecto al módulo de silicio.

Tabla 4-6 Modelos generados a partir del análisis de varianza.

Condición	Modelo
28 días curado en seco	$RMC(MPa) = -115.7 - 0.815\%C + 24.94\%Na_2O + 109M_S$ $+ 0.01276(\%C)^2 - 1.136(Na_2O)^2 - 30.9(M_S)^2$ $- 0.1138(\%C)(\%Na_2O)$
28 días curado bajo agua	$RMC(MPa) = 7.62 - 0.914\%C + 9.03\%Na_2O + 10.34M_S$ $+ 0.00881(\%C)^2 - 0.576(Na_2O)^2$

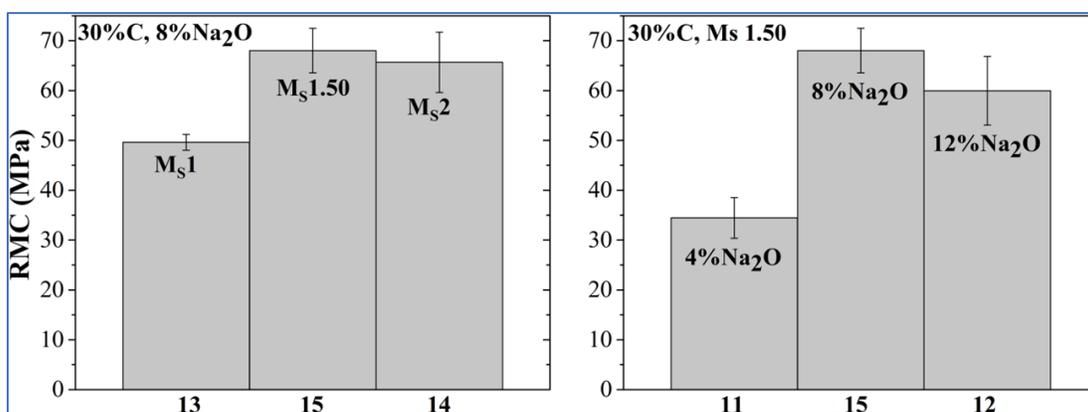


Figura 4-7 Comparación del efecto de M_s y %Na₂O sobre la resistencia mecánica a la compresión a 28 días.

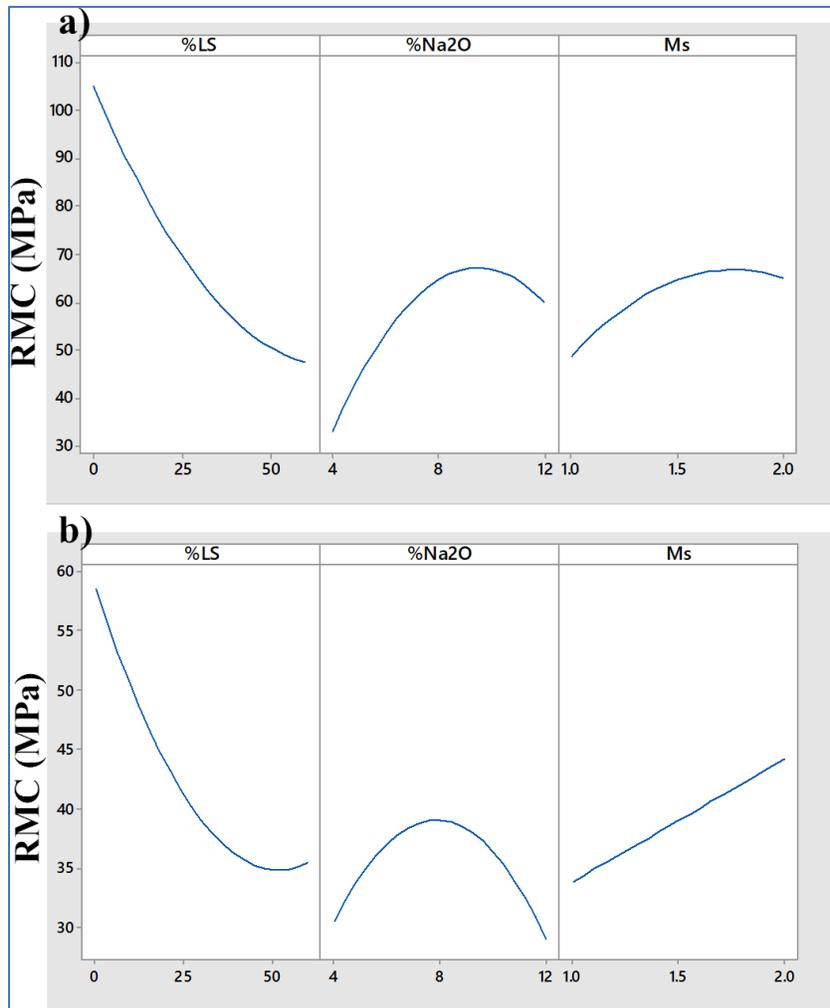


Figura 4-8 Efecto de los factores sobre la resistencia mecánica a la compresión a 28 días de curado en a) seco y b) bajo agua.

La Figura 4-9 se presentan los valores de RMC obtenidos para ambos tipos de curado a 90, 120 y 180 días. A 90 días en seco, la RMC fue en aumento y las pastas 1, 3, 7, 9 y 14 pastas desarrollaron 80.2, 89, 97.3, 107.3 y 82.3 MPa. Las muestras curadas bajo agua no mostraron diferencias significativas de RMC con respecto a 28 días bajo el mismo tipo de curado. A 120 días de curado en seco, la pasta 9 (0%C, 100%V, 8%NaO₂, M_s 1.50) alcanzó 131 MPa y las 16 pastas restantes desarrollaron RMC entre 25 y 85 MPa. Por su parte, las pastas curadas bajo agua presentaron valores menores a 50 MPa.

A 180 días de curado en seco, las pastas 8 (45%C, 55%V, 10%NaO₂, M_s 1.75), 9 (0%C, 100%V, 8%NaO₂, M_s 1.50) y 15 (30%C, 70%V, 8%NaO₂, M_s 1.50) desarrollaron 91, 133 y 93.6 MPa, respectivamente. Pudo observarse que, para todos los tiempos de curado bajo agua, las pastas presentaron carácter hidráulico y que la pasta 9 desarrolló altas RMC desde los 7 y hasta los 180 días, con respecto a las pastas restantes. Esto corresponde con la influencia de los factores referida anteriormente: 0% de caliza (100%) y módulo de 1.50.

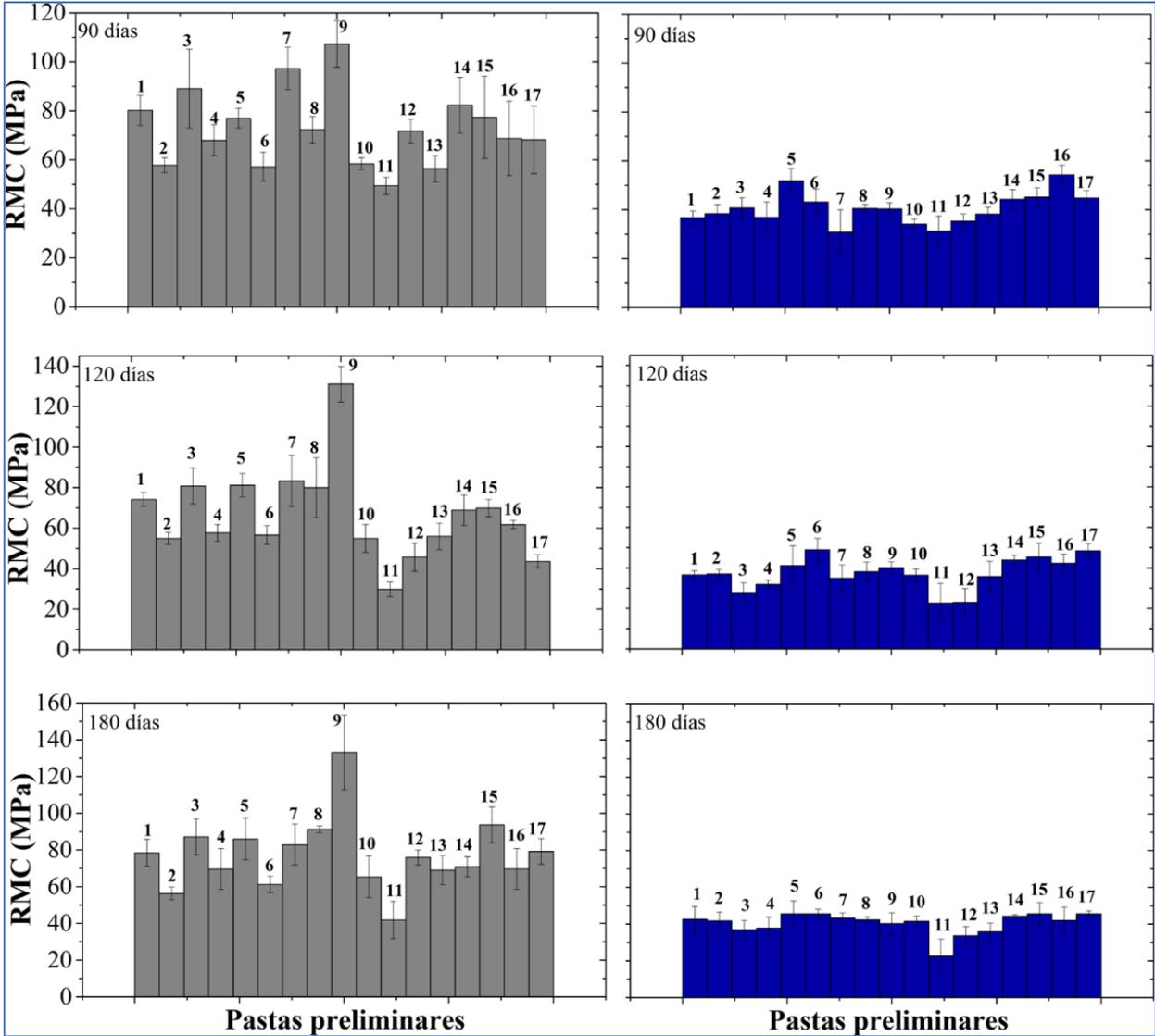


Figura 4-9 Resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares curadas en seco y bajo agua a 90, 120 y 180 días.

Tabla 4-7 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas preliminares, curadas bajo agua a 40°C.

Pasta	Formulaciones				Resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar											
	%C	%V	%NaO ₂	Ms	7d		14d		28d		90d		120d		180d	
1	15	85	6	1.25	45.2	1.4	43	3	35.5	3.3	36.7	2.7	36.6	2	42.6	7
2	45	55	6	1.25	34	4	33.5	4.5	37.5	3.8	38.4	3.7	36.9	2.4	41.8	4.7
3	15	85	10	1.25	42	4	34.3	1.3	34.6	2.88	40.7	4.2	28	4.7	37	5
4	45	55	10	1.25	31.4	2	28	1.7	34.6	2.7	37	6.3	31.8	2	38	6
5	15	85	6	1.75	44.6	2.5	45	1.8	41	13	51.88	5	41	9.7	45.6	7
6	45	55	6	1.75	35.7	3.6	40.7	2	30.3	10.6	43	5.2	48.9	5.6	45.6	2.5
7	15	85	10	1.75	48.3	1.3	45.7	4.3	40.4	5.4	31	9	34.8	6.6	43.3	2.7
8	45	55	10	1.75	36	3.8	34	0.1	37	3.3	40.6	1.7	38.20	4.8	42.3	1.6
9	0	100	8	1.50	63.2	7.4	48.5	7.7	29.6	9	40.3	2.5	40	3	40.3	6
10	60	40	8	1.50	34.6	3.4	29.7	3	29.6	7.8	34	2	36.4	3	41.5	2.8
11	30	70	4	1.50	29.5	4.7	28	2.6	28.8	12.3	31.3	6.2	22.7	9.5	22.7	9.2
12	30	70	12	1.50	29.6	4	30.2	6	27.6	5.4	35.3	3	23	7	33.7	5
13	30	70	8	1	30.2	4.7	30	1	30	5	38.30	2.8	35.7	7.5	35.8	4.7
14	30	70	8	2	43	4	44	2.2	35	3.7	44.2	4	43.8	2.5	44.3	1
15	30	70	8	1.50	34.7	10.3	33.7	1.5	36.5	6.6	45.2	3.7	45.4	7	45.6	6
16	30	70	8	1.50	41.6	7.3	30	3	36.4	6.3	54.30	4	42.3	4.5	42	7.2
17	30	70	8	1.50	43.6	10.7	40.4	5.4	42.7	3.4	44.8	3	48.5	3.6	45.6	1.6

4.2.2 Pastas óptimas y morteros.

Como se mencionó en la sección 3.4.1, a partir del análisis de varianza de RMC de las pastas preliminares, fueron seleccionadas formulaciones óptimas para preparar pastas. Las proporciones de cemento consideradas para estas pastas fueron 0, 5, 15 y 25% (Tabla 4-8).

Tabla 4-8 Formulaciones óptimas de pastas.

<i>Pasta</i>	<i>Precursores</i>		<i>Activadores</i>		<i>% Na₂O</i>	<i>Si₂O/Na₂O (M_s)</i>	<i>a/c</i>
	<i>%C</i>	<i>%V</i>	<i>% CPC- 30R</i>				
PO1	0	100	15	Na ₂ (SiO ₃) / NaOH	9.33	2	0.33
PO2	15	85	15		8		
PO3	45	55	15		8		
PO4	45	55	5		8		
PO5	45	55	25		8		
PO6	30	70	15		8		
PRef	45	55	0		8		

La Figura 4-10 presenta los resultados de RMC de pastas óptimas curadas hasta 28 días, en seco a 40°C (a) y 20°C (b). Las pastas curadas a 40°C que desarrollaron altas RMC fueron las de mayor contenido de vidrio: PO1 (100%V) y PO2 (85%V) con valores de 99.4, 81 y 60.5 MPa. Las pastas PO3, PO4, PO5 y PO6, desarrollaron 55.3, 58.5, 43.2 y 60.5 MPa, respectivamente. No se notaron efectos significativos de la cantidad de cemento presente en las pastas (15%, 5% y 25%) con el mismo contenido de caliza y vidrio (45%C:55%V): PO3, PO4 y PO5 con respecto al desarrollo de RMC a 28 días. Sin embargo, la menor RMC (30.8 MPa) fue desarrollada por la pasta de referencia (sin contenido de cemento). Los valores RMC se presentan en la Tabla 4-9.

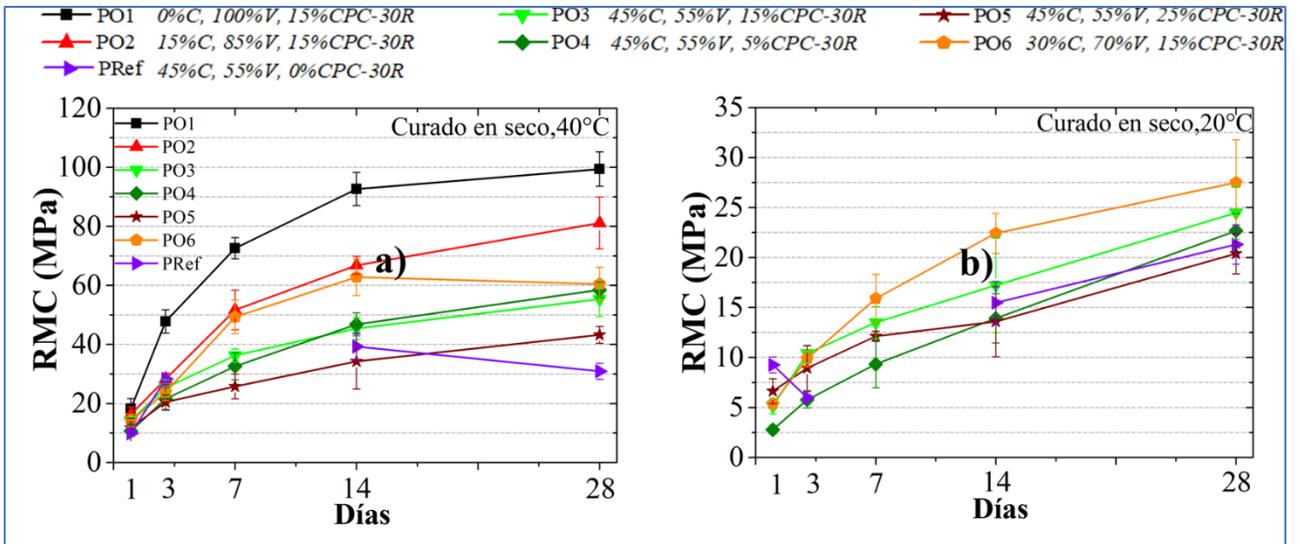


Figura 4-10 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, a 28 días de curado en seco a 40°C (a) y 20°C (b).

Tabla 4-9 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas en seco a 40°C.

Pasta	Formulaciones					Resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar													
	%C	%V	% CPC-30R	% NaO ₂	Ms	1d		3d		7d		14d		28d		90d		120d	
PO1	0	100	15	9.33	2	18.3	3.4	47.8	4	72.6	3.6	92.6	5.6	99.4	5.8	81.6	13	111.7	12
PO2	15	85	15	8		16.3	2.5	28.2	2	51.6	6.7	66.8	3	81	8.8	51	7	95.8	11
PO3	45	55	15			14.2	1	25.3	2.7	36.2	2.2	45.4	3.7	55.3	6	41	2	68.4	2.5
PO4	45	55	5			10.7	1.8	21.5	3.8	32.6	4.5	46.7	4	58.5	2.6	26.8	5	58	4.8
PO5	45	55	25			11.8	1.3	20.4	2.5	25.7	4.2	34.2	9.3	43.2	2.8	31.3	3.4	49	8
PO6	30	70	15			14	2	23.8	3	49.3	5.7	62.8	6.3	60.4	5.6	79.4	4.4	77.7	11.6
PRef.	45	55	0			9.8	0.7	28.2	1.7	-----	-----	39.3	4.5	30.8	2.7	86	13.8	-----	-----

Por otro lado, a partir de los modelos obtenidos con base en el análisis de varianza (Tabla 4-6) se predijeron RMC de las pastas PO1, PO2 y PO3 a 28 días de curado en seco y bajo agua. En la Tabla 4-10 se comparan los valores esperados con los experimentales. Puede observarse que a excepción de la pasta PO1, curada bajo agua, los valores experimentales correspondieron con los esperados, lo cual valida el modelo obtenido.

Tabla 4-10 Valores esperados de resistencia mecánica a la compresión de pastas curadas en seco y bajo agua a 28 días.

Curado en seco				
RMC (MPa)		PO1	PO2	PO3
Valores esperados	inferior	95.8	67.6	47.6
	promedio	112.5	82.4	53.6
	superior	129	97.2	59.6
Valores experimentales	promedio	99.4 ± 5.8	81 ± 8.8	55.3 ± 6
Curado bajo agua				
Valores esperados	inferior	51	41.2	29.7
	promedio	62.4	52	40.4
	superior	73.8	62.7	51.2
Valores experimentales	promedio	29.8 ± 3.5	40.3 ± 1.7	38.6 ± 4.8

Las pastas PO1 (0%C:100%V), PO2 (15%C:85%V) y PO3 (45%C:55%V) se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido. Fragmentos de las pastas fueron embebidas en resina epóxica, para luego ser sometidas a proceso de desbaste con lijas de diferentes tamaños de grano de carburo de silicio (#100, #220, #400, #600, #1200 and #1500). Posteriormente las muestras fueron pulidas con pasta de diamante de 1 y 0.25 μm , utilizando alcohol como lubricante. Las muestras fueron recubiertas con Au/Pd para hacerlas conductoras del haz de electrones. En la Figura 4-11 pueden observarse las microestructuras de las pastas a 28 días de curado en seco a 40°C. En la micrografía presentada en la Figura 4-11 a) pueden observarse partículas de vidrio con su característica forma angular cemento.

En la micrografía b), pueden observarse partículas de vidrio y caliza. Análisis elemental en esta última partícula indicaron presencia de 14.2 %Ca, 6.46 %Fe, 4.9 %Al, 1.1 %Si, 0.7 Mg%, 0.2 %Na (% en peso) lo que podría corresponder a una partícula de cemento sin reaccionar. En la micrografía c), puede observarse partículas de caliza parcialmente disueltas y una partícula de vidrio con un anillo de reacción alrededor. Las grietas que se observan en las muestras pueden deberse a la preparación de la muestra (desbaste y pulido).

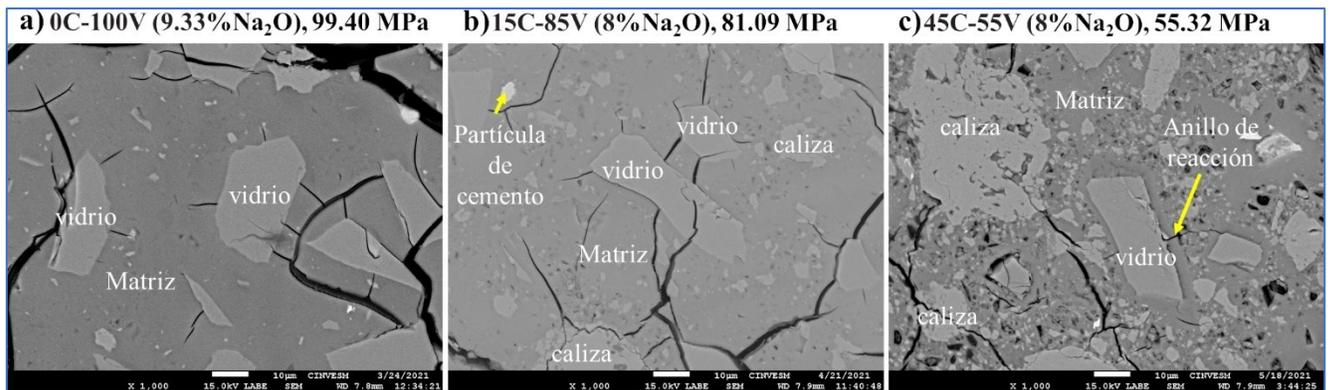


Figura 4-11 Microestructuras (1000X) de pastas óptimas a 28 días de curado en seco a 40°C.

En la Figura 4-12 puede observarse la evolución de fases a través de difractogramas de rayos X realizados en polvos de pastas a 1, 28 y 90 días de curado en seco. Puede notarse que el halo amorfo característico del vidrio va disminuyendo con el tiempo, indicando que participa en las reacciones químicas, disolviéndose para formar productos cementosos. Se observaron picos de calcita ($29.18^{\circ}2\theta$ - $29.43^{\circ}2\theta$), como parte de la materia prima del cemento o como resultado de la carbonatación de los productos cementosos formados. Las altas RMC de las pastas indican la formación de C-S-H ($29.43^{\circ}2\theta$ - $29.59^{\circ}2\theta$) como ha sido reportado en otros trabajos [132,133]; sin embargo, esta fase es predominantemente amorfa y no se observó claramente en los patrones de difracción de rayos X.

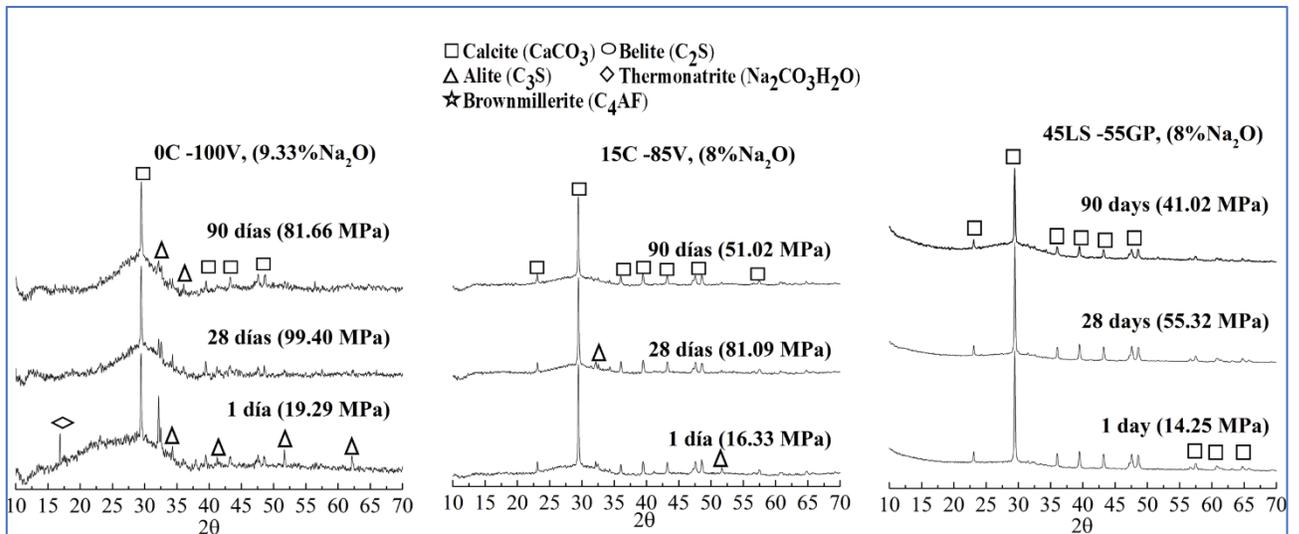


Figura 4-12 Evolución de fases a 1, 28 y 90 días de curado en seco.

En la Figura 4-13 se presentan los resultados de RMC de pastas óptimas curadas a 90 y 120 días en seco a 40°C. A 90 días, las pastas con alto contenido de vidrio y la de referencia (0%CPO) presentaron altas RMC: 81.6 MPa (PO1), 79.4 (PO6) y 86 (PRef). Las pastas con diferentes contenidos de cemento; PO3 (15%), PO4(5%) y PO5(25%), y con el mismo contenido de caliza; (45%) y vidrio (55%), desarrollaron 55.3 MPa, 58.5 MPa y 43.3 MPa, respectivamente. A 120 días de curado, las pastas con mayor contenido de vidrio, PO1 y PO2, desarrollaron: 111.7 MPa y 95.8 MPa, respectivamente. La pasta PO6 obtuvo un valor de 77.6 MPa y las pastas PO3, PO4 y PO5, 68.4 MPa, 58 MPa y 49.3 MPa, respectivamente. Es notable que, a grandes tiempos de curado, el contenido de 15% de CPC-30R tiene el efecto de incrementar la RMC de las pastas, en comparación con los contenidos de 5% y 25%.

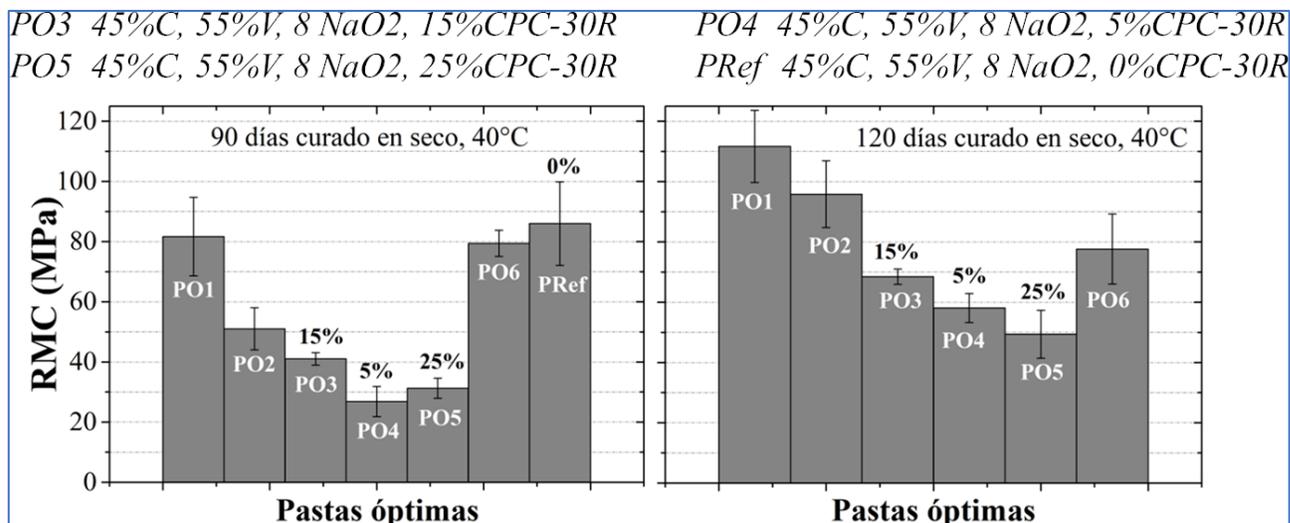


Figura 4-13 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas a 90 y 120 días de curado en seco a 40°C.

En el caso de las pastas óptimas curadas en seco a 20°C, a 28 días de curado (Figura 4-10, Tabla 4-11), la PO6 (30%C:70%V) obtuvo el mayor valor de RMC con 27.5 MPa, seguido de la pasta PO3 (45%C:55%V) con 24.5 MPa. Es notable la diferencia entre las RMC desarrolladas a temperaturas de curado de 20°C y 40°C, lo que indica que la temperatura es un factor importante en el desarrollo de RMC [134].

A 90 días de curado (Figura 4-14) en seco, las pastas PO6 y PRef incrementaron sus valores de 27.5 MPa a 53.3 MPa y de 21.3 MPa a 36.8 MPa, respectivamente. La alta cantidad de vidrio en PO6 (70%) y la ausencia de cemento (PRef) tuvieron efecto en el desarrollo de RMC. Las pastas PO3, PO4 y PO5, con 15%, 5% y 25% de cemento, respectivamente, desarrollaron resistencias similares. La Tabla 4-11 contiene los valores de RMC desde 1 y hasta 90 días de curado.

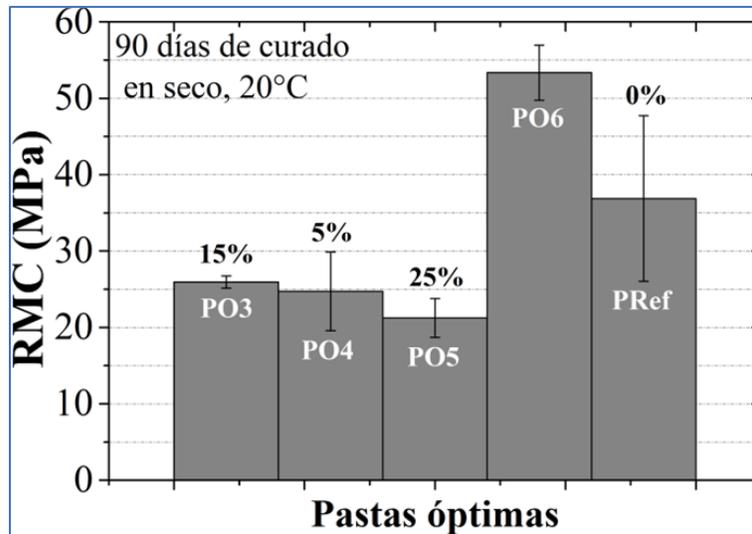


Figura 4-14 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas a 90 días de curado en seco a 20°C.

Tabla 4-11 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas en seco a 20°C.

Pasta	Diseño de formulaciones					Promedio resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar											
	% C	% V	% CPC -30R	% NaO ₂	M s	1d		3d		7d		14d		28d		90d	
PO3	45	55	15	8	2	5	0.7	10.4	0.7	13.5	1.6	17.2	4.7	24.5	2.6	26	0.8
PO4	45	55	5			2.7	0.4	5.7	0.8	9.3	2.4	14	2.4	22.7	1.7	24.7	5
PO5	45	55	25			6.6	1.2	9	2.2	12	0.5	13.6	3.5	20.4	2	21.2	2.5
PO6	30	70	15			5.3	0.4	9.8	0.8	16	2.4	22.4	2	27.5	4.2	53.3	3.6
PRef.	45	55	0			9.2	0.8	6	0.3	----	----	15.4	2	21.3	2	36.8	10.8

La Figura 4-15, presenta los resultados de RMC de pastas óptimas curadas a 7, 14 y 28 días, bajo agua a 40°C y 20°C. A 7 días de curado a 40°C, la pasta PO2 desarrolló 58 MPa, seguido de las pastas PO1 con 46.6 MPa y PO6 con 44.4 MPa. Las pastas PO3 y PO5 desarrollaron valores similares (38.78 MPa y 35.7 MPa, respectivamente). Las menores resistencias fueron desarrolladas por PO4 (26.8 MPa) y PRef (10.3 MPa). A 14 días, las RMC disminuyeron ligeramente, a excepción de la pasta de referencia, la cual no presentó cambio significativo.

A 28 días, la pasta PO1 disminuyó alrededor de 13 MPa, mientras que las pastas restantes no presentaron cambios significativos. Para todos los tiempos de curado, la pasta de referencia (sin contenido de cemento) desarrolló bajos valores de RMC, lo que indica que aún en bajas proporciones, el contenido de cemento tiene efecto en el desarrollo de carácter hidráulico. Las Tabla 4-12 y 4-13 contiene los valores de RMC a 7, 14 y 28 días de curado a 40°C y 20°C.

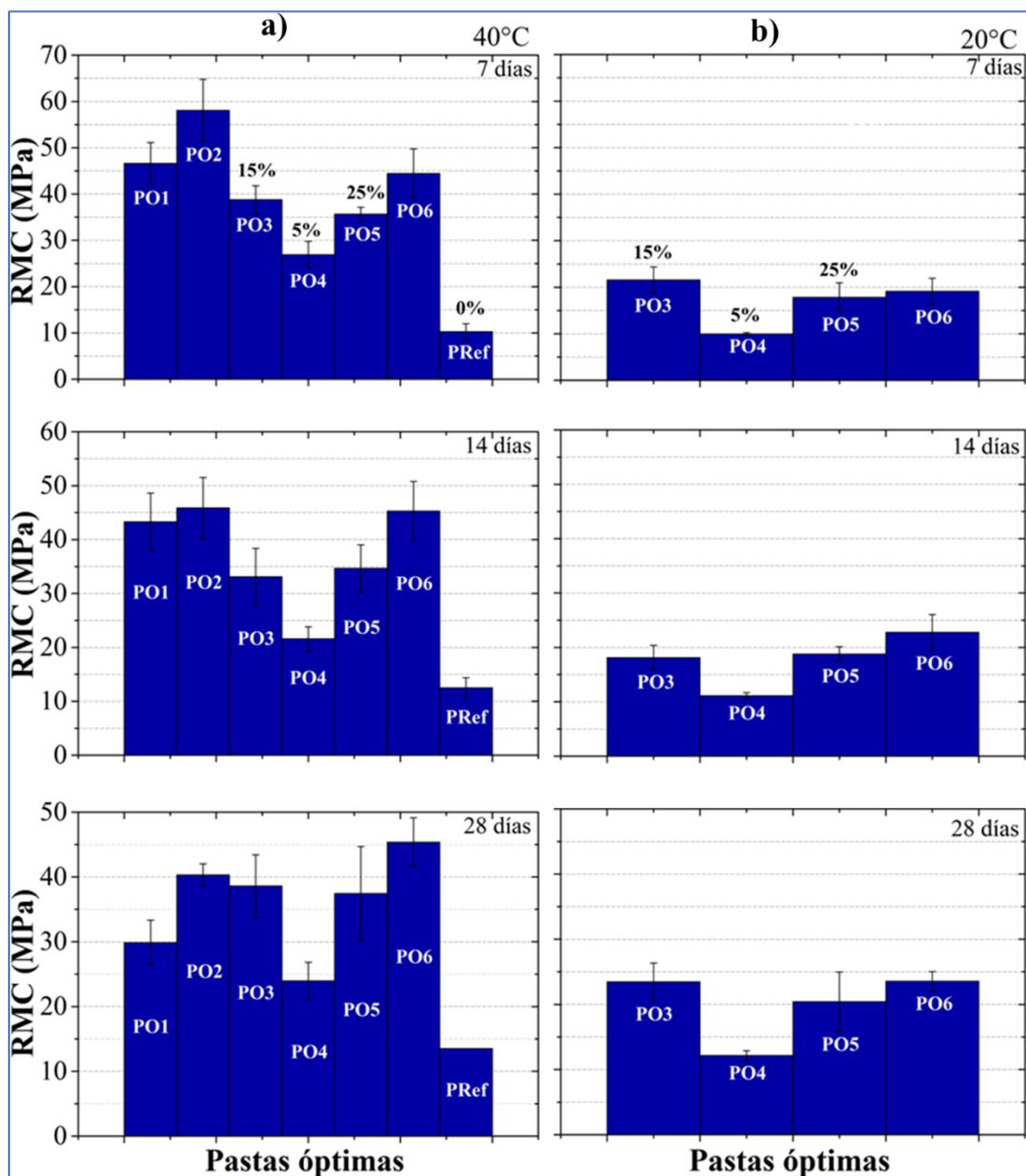


Figura 4-15 Resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas a 7, 14 y 28 días de curado bajo agua: a) 40°C y b) 20°C.

Tabla 4-12 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas bajo agua a 40°C.

Pasta	Diseño de formulaciones					Resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar					
	% C	% V	% CPC-30R	% NaO ₂	Ms	7d		14d		28d	
PO1	0	100	15	8	2	46.6	4.5	43.3	5.3	29.8	3.5
PO2	15	85	15			58	6.7	45.8	5.7	40.3	1.7
PO3	45	55	15			38.7	3	33	5.3	38.6	4.8
PO4	45	55	5			26.8	2.8	21.6	2.2	24	2.8
PO5	45	55	25			35.7	1.5	34.6	4.3	37.4	7.3
PO6	30	70	15			44.4	5.3	45.3	5.5	45.4	3.7
PRef	45	55	0			10.3	1.7	12.5	1.8	13.5	0

Con respecto a las muestras curadas a 20°C, no se tienen datos de RMC de las pastas de referencia (PRef), ya que desde los primeros días de curado sufrieron deterioro físico (agrietamiento y desprendimiento de material en las caras), lo cual no permitió realizar ensayos de RMC. El efecto de alta temperatura en el curado bajo agua también fue un factor de influencia en el desarrollo de carácter hidráulico. Con respecto al efecto del contenido de las bajas proporciones de cemento, la pasta PO4 con 5% desarrolló el menor valor de RMC con respecto a las pastas con 15% y 25%.

Tabla 4-13 Valores de resistencia mecánica a la compresión de pastas óptimas, curadas bajo agua a 20°C.

Pasta	Diseño de formulaciones					Resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar					
	% C	% V	% CPC-30R	% NaO ₂	Ms	7d		14d		28d	
PO3	45	55	15	8	2	21.6	2.8	18	2.2	23.5	2.8
PO4	45	55	5			10	0.3	11.1	0.5	12	0.7
PO5	45	55	25			17.8	3	18.7	1.4	20.4	4.5
PO6	30	70	15			19	2.8	22.8	3.2	23.5	1.5
PRef.	45	55	0			----	----	----	----	----	----

Por otro lado, como se mencionó en la sección 3.4.1, fueron preparados morteros (1:2.5, a/c=0.35) utilizando las formulaciones de pastas que desarrollaron altas RMC: PO1 (0%C, 100%V, 9.33%NaO₂), PO2 (15%C, 85%V, 8%NaO₂), PO3 (45%C, 55%V, 8%NaO₂) y PO6 (30%C, 70%V, 8%NaO₂). Los morteros fueron etiquetados como: MO1 (0%C, 100%V, 9.33%NaO₂), MO2 (15%C, 85%V, 8%NaO₂), MO3 (30%C, 70%V, 8%NaO₂) y MO4 (45%C, 55%V, 8%NaO₂). La Figura 4-16 presenta los resultados de RMC con hasta 120 días de curado en seco a 40°C.

A 28 días de curado, los morteros desarrollaron: 75.3 MPa (MO1), 50 MPa (MO2), 53.6 (MO3) y 33.2 MPa (MO4). A 90 días las resistencias desarrolladas fueron 74 MPa, 68 MPa, 62.4 MPa y 50.4 MPa, respectivamente. Puede observarse que los morteros con mayor contenido de vidrio (100%, 85% y 70%) desarrollaron altas RMC. Sin embargo, a 120 días de curado, la RMC de todos los morteros disminuyó de manera considerable: 46 MPa (MO1), 57.8 MPa (MO2), 46.7 MPa (MO3) y 42.4 MPa (MO4). La Tabla 4-14, contiene los valores de RMC desde 1 y hasta 120 días.

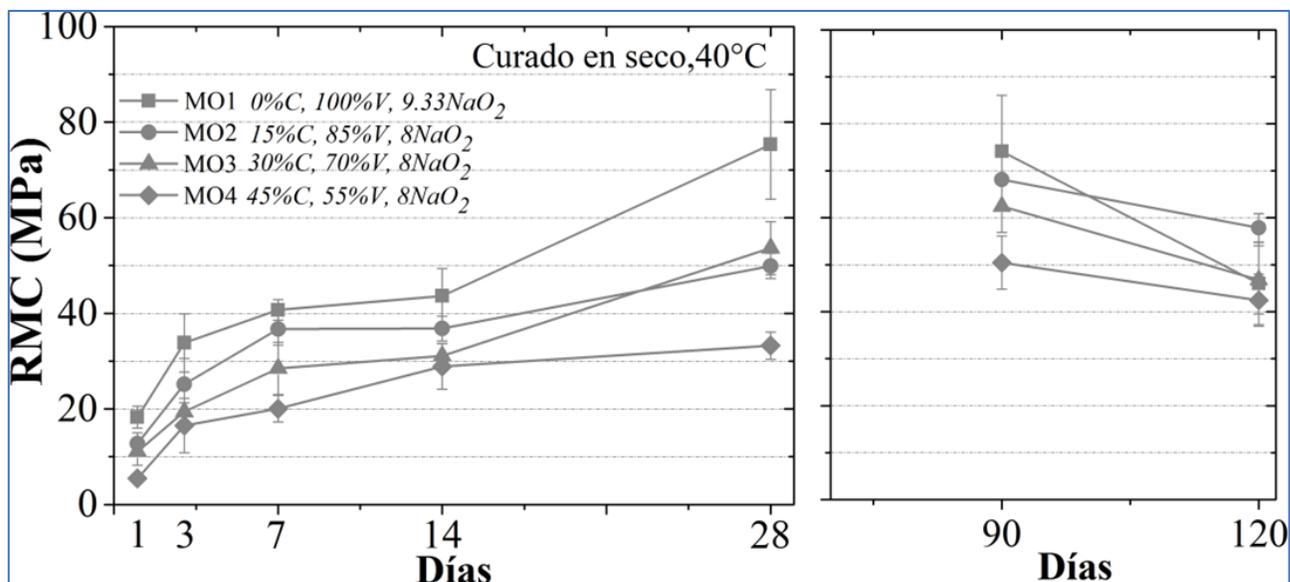


Figura 4-16 Resistencia mecánica a la compresión de morteros a 28, 90 y 120 días de curado en seco a 40°C.

Tabla 4-14 Resistencia mecánica a la compresión de morteros, curados en seco a 40°C.

Mortero	Formulaciones					Resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar													
	% C	% V	% CPC -30R	% NaO ₂	Ms	1d		3d		7d		14d		28d		90d		120d	
MO1	0	100	15	9.33	2	18.3	2.3	33.8	6	40.7	2	43.6	5.7	75.3	11.4	74	12	46	8.7
MO2	15	85		8		12.7	2.3	25	5.4	36.7	3.3	36.8	2.6	50	2.6	68	5.8	57.8	3
MO3	30	70		11		2.8	19.4	1.8	28.5	5.5	31	2.6	53.6	5.5	62.4	5.5	46.7	7.2	
MO4	45	55		5.5		0.1	16.5	5.7	20	2.8	29	4.7	33.2	2.8	50.4	5.6	42.4	5.5	

Con respecto al curado bajo agua, todas las muestras presentaron carácter hidráulico desde 7 y hasta 90 días de curado a 40°C, como se presenta en la Figura 4-17. Se observa que a 7 días de curado, los morteros MO1, MO2, MO3 y MO4 desarrollaron 58.4, 56.5, 40.6 y 46 MPa, respectivamente. A 14 días, las RMC se mantuvieron sin cambios significativos y a 28 días, las muestras MO1 y MO2 incrementaron sus RMC en 14 MPa y 12 MPa, respectivamente. Es de notar que, a 90 días, el mortero MO1 disminuyó 15 MPa. Los morteros MO2 y MO3 coincidieron con 54.2 MPa. Por su parte, el mortero MO4 aumentó 10 MPa. La Tabla 4-15, contiene los valores de RMC de morteros curados desde 7 y hasta 90 días bajo agua a 40°C.

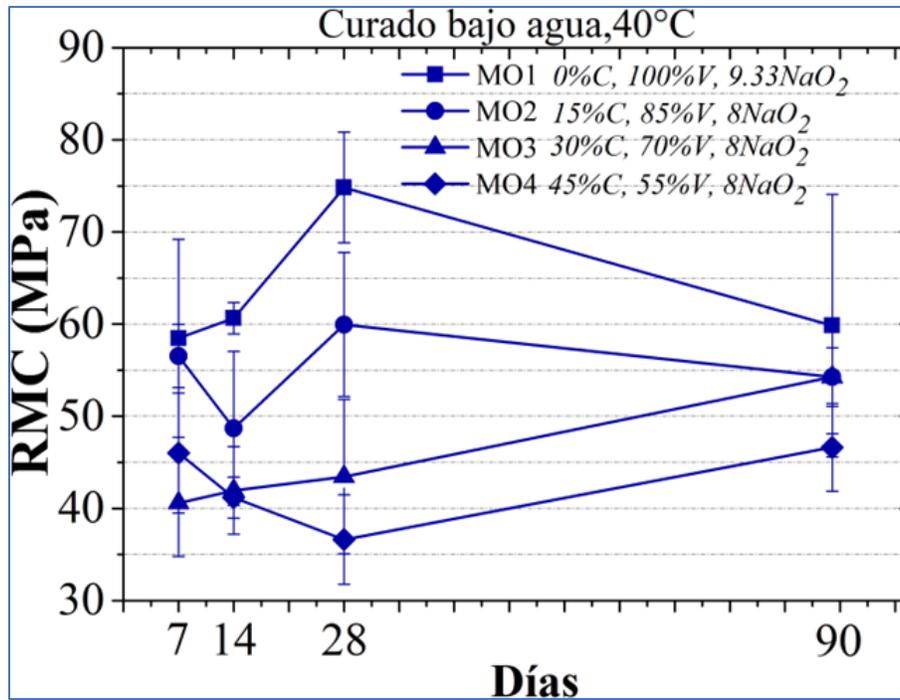


Figura 4-17 Resistencias mecánicas a la compresión de morteros, a 7, 14, 28 y 90 días de curado bajo agua a 40°C.

Tabla 4-15 Resistencia mecánica a la compresión de morteros, curados bajo agua a 40°C.

Mortero	Formulaciones					Promedio resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar							
	% Caliza	% Vidri o	% CPC-30R	% NaO ₂	Ms	7d		14d		28d		90d	
MO1	0	100	15	9.33	2	58.4	10.7	60.6	1.7	74.8	6	59.8	14.4
MO2	15	85		8		56.5	3.4	48.7	8.3	60	7.8	54.2	3.2
MO3	30	70		40.6		5.8	42	4.7	43.4	8.4	54.2	6.2	
MO4	45	55		46		6.5	41.2	2.2	36.6	4.8	46.6	4.7	

4.2.3 Pastas con activadores en polvo.

Como se mencionó en la sección 3.4.3, se prepararon pastas con activadores en polvo tipo de una parte, las cuales son más prácticas en su preparación. La Figura 4-18 presenta los resultados de RMC de estas pastas con edades de curado desde 1 y hasta 120 días en seco a diferentes regímenes de temperaturas. Las resistencias fueron en aumento desde 1 y hasta 7 días, mientras que, entre 14 y 28 días, los valores no presentaron cambios significativos a excepción de la pasta PAP1 ($M_s=0.89$) cuya RMC disminuyó alrededor de 20 MPa.

A 90 días de curado, las pastas PAP1 y PAP2.1, incrementaron sus RMC de manera considerable a 50.4 MPa y 76.5 MPa, respectivamente, en tanto que las pastas restantes no presentaron cambios significativos. A 120 días, no se presentaron cambios en las RMC a excepción de la pasta PAP2.1, la cual disminuyó 32 MPa. Aun así, puede notarse que 40°C es una temperatura adecuada para el desarrollo de RMC. Los valores de todas las RMC se presentan en la Tabla 4-.

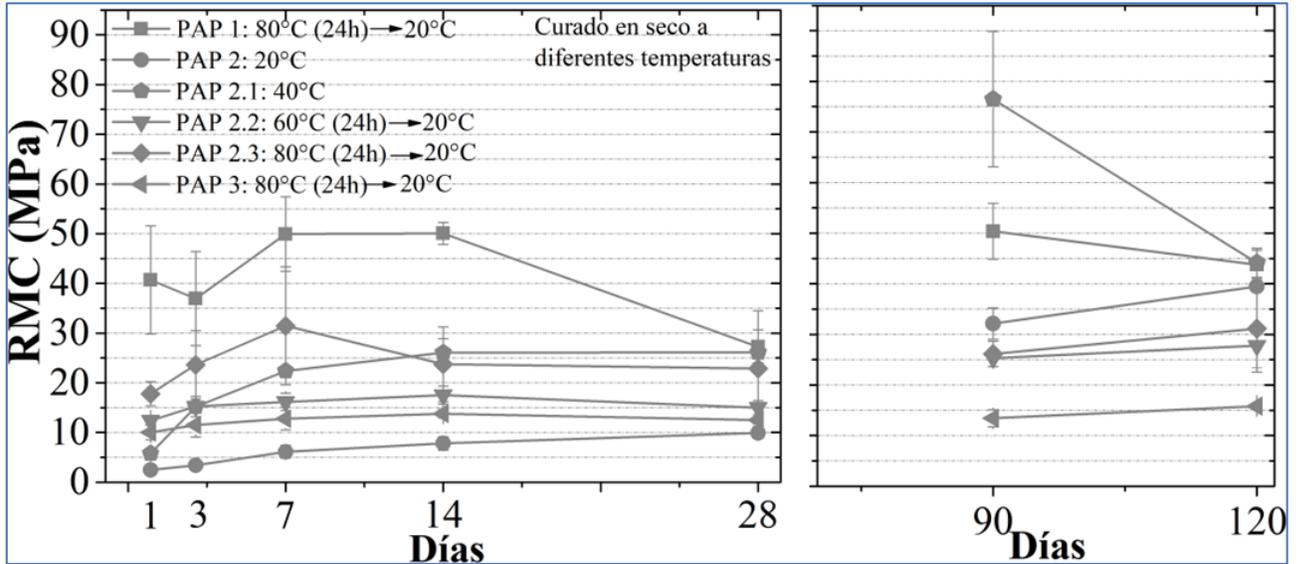


Figura 4-18 Resistencias mecánicas a la compresión de pastas con activador en polvo, desarrolladas desde 1 y hasta 120 días de curado a diferentes temperaturas.

Tabla 4-16 Resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo, curadas en seco a diferentes regímenes de temperaturas.

Pasta	Formulaciones				Ms	Promedio resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar															
	% C	% V	% NaO ₂	% CPC-30R		1d	3d	7d	14d	28d	90d	120d									
PAP 1	45	55	8	15	0.89	40.7	11	37	9.4	50	7.5	50	2.2	27.2	3.4	50.4	5.5	43.8	2.8		
PAP 2					2.5	0.6	3.4	0.4	6	1.3	7.8	1.3	10	1	32	3	39.4	7.6			
PAP 2.1					5.8	0.8	15.2	2	22.4	0.8	26	2.8	26	2	76.5	13.3	44	2.8			
PAP 2.2					12.4	0.8	15.2	0.5	16.2	1.7	17.5	1.8	15	1.4	25.3	1.6	27.7	4.4			
PAP 2.3					17.8	2.4	23.6	6.8	31.4	11.8	23.7	7.5	22.8	11.6	26	2.5	31	8.6			
PAP 3					3.27	10	1.5	11.5	2.4	12.7	2.3	13.8	0.8	12.5	0.8	13.4	1.7	15.8	0.6		

Con respecto a las pastas curadas bajo agua, la Figura 4-19 presenta los resultados de RMC desde 7 y hasta 90 días. Los resultados de RMC son presentados en la Tabla 4-17. Puede observarse que todas las pastas desarrollaron carácter hidráulico. A partir de los 14 y hasta los 90 días de curado, los valores de las resistencias no presentaron cambios significativos.

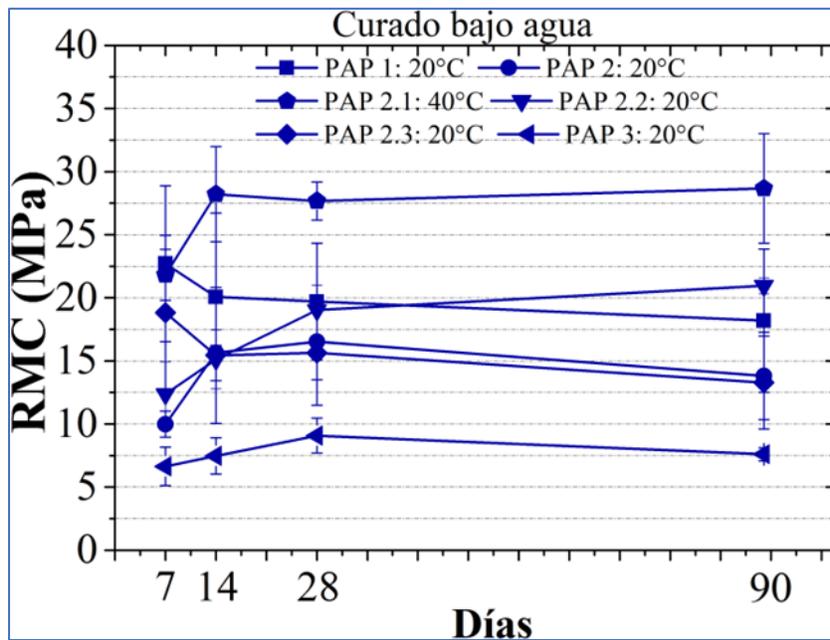


Figura 4-19 Resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo, desarrolladas desde 7 y hasta 90 días de curado bajo agua.

Es notable que las resistencias mecánicas desarrolladas por las pastas con activadores en polvos son menores con respecto a las pastas que utilizaron solución activadora. En la Tabla 4-18 se comparan las RMC de pastas con las mismas formulaciones con solución activadora y activadores en polvo, curadas en seco a 40°C. Aunque, puede observarse que, a 90 días, la pasta con activadores en polvo desarrolló 76.5 MPa, disminuyendo a 44 a 120 días.

Tabla 4-17 Resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo, curadas bajo agua desde 7 y hasta 90 días.

Pasta	Formulaciones				Ms	Promedio resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar							
	% C	% V	% NaO ₂	% CPC-30R		7d		14d		28d		90d	
PAP 1	45	55	8	15	0.89	22.7	6.2	20	6.6	19.7	4.6	18.2	5.7
PAP 2					10	1	15.6	0.5	16.5	3	13.8	3.4	
PAP 2.1					21.8	2	28.2	3.8	27.7	1.5	28.6	4.3	
PAP 2.2					12.4	2.5	15	2.3	19	2	21	0.6	
PAP 2.3					18.8	6	15.4	5.4	15.6	4	13.2	3.7	
PAP 3					3.27	6.6	1.5	7.5	1.4	9	1.4	7.6	0.5

Tabla 4-18 Comparación de resistencia mecánica a la compresión de pastas con activador en polvo y con solución activadora a 28, 90 y 120 días de curado.

Formulaciones					Promedio resistencia mecánica a la compresión (MPa)/Desviación estándar						
45% Caliza	55% Vidrio	8% NaO ₂	15% CPC-30R	Ms=2	28d		90d		120d		
					Curado en seco						
Activadores en polvo					26	2	76.5	13.3	44	2.8	
Solución activadora					55.3	6	41	2	68.4	2.5	
					Curado bajo agua						
Activadores en polvo					27.7	1.5	28.6	4.3	—	—	
Solución activadora					36.6	4.8	46.6	4.7	—	—	

Conclusiones.

- El polvo de vidrio reciclado utilizado como sustituto parcial del cemento (5%, 10%, y 15%) ayudó a controlar el proceso de corrosión del acero de refuerzo embebido en concretos con agregados de roca caliza de la península de Yucatán. Asimismo, incrementó el tiempo de inicio de la corrosión en el acero de refuerzo hasta por 30 y 35 meses para los concretos con 5% de vidrio y con relaciones a/c de 0.40 y 0.50, respectivamente.
- No fue encontrado un cambio significativo en la resistencia mecánica a la compresión de los concretos conteniendo 5 %, 10% y 15 % de polvo de vidrio, después de 540 días de curado. No obstante, el índice de actividad indicó una cierta reactividad y efecto positivo del vidrio sobre el desarrollo de RMC.
- Las proporciones de sustitución de polvo de vidrio no impidieron el proceso de carbonatación en los concretos. Sin embargo, con 5% de vidrio y relaciones a/c de 0.50, 0.60 y 0.70, se obtuvieron las menores profundidades de carbonatación (8, 7.5 y 9 mm, respectivamente) a 48 meses de exposición.
- Con respecto a los cementos activados por álcalis, roca caliza y botellas de vidrio pulverizados, con finura de entre 607-626 m²/kg y 642-694 m²/kg pueden ser utilizados como precursores en mezclas de pastas y morteros.
- De acuerdo con el análisis de varianza, los principales factores que tiene influencia en el desarrollo de resistencia mecánica de pastas curadas en seco y bajo agua a 40°C fueron: %caliza, %Na₂O y la relación Si₂O/Na₂O (M_s). Además, los valores esperados de resistencia mecánica a 28 días de curado, obtenidos a partir de los modelos matemáticos generados, correspondieron con los valores medidos en los ensayos
- Las condiciones que favorecieron en pastas óptimas el desarrollo de alta resistencia mecánica a la compresión (99.4 MPa) a 28 días de curado fueron: 0%C:100%V, 15%CPC-30R, 9.3% Na₂O, M_s=2 y temperatura de curado en seco de 40°C.

- Los altos valores de resistencias mecánicas obtenidos en pastas óptimas y en morteros hechos a partir de estas, así como el carácter hidráulico que presentaron en condiciones de curado bajo agua, indican la formación de la fase C-S-H.
- Al igual que en las pastas obtenidas a partir de cementos activados de dos partes, la temperatura de 40°C también fue la condición que favoreció el desarrollo de resistencia mecánica en muestras curadas en seco y bajo agua.

Posibles trabajos futuros:

1. Incrementar el porcentaje de sustitución polvo de vidrio reciclado en concretos expuestos a la brisa marina.
2. Preparar muestras de concreto con distintos tamaños de partícula del vidrio y exponerlas a pruebas de intemperismo acelerado.
3. Aplicar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para evaluar el costo/beneficio de usar polvo de vidrio reciclado en la preparación de concretos con acero de refuerzo embebido para ambiente marino tropical, como el de la Península de Yucatán
4. Investigar proporciones óptimas de precursores y activadores para obtener pastas, con arena caliza de la Península de Yucatán.

Bibliografía.

1. García Guerrero J, Rodríguez Reséndiz J, Rodríguez Reséndiz H, Álvarez-Alvarado JM, Rodríguez Abreo O. Sustainable Glass Recycling Culture-Based on Semi-Automatic Glass Bottle Cutter Prototype. Sustainability. 2021 Jun 4;13(11):6405. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su13116405>
2. Hall C. On the history of Portland cement after 150 years. 1976 Apr 1 ; Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ed053p222>
3. Fry M. Cement, carbon dioxide, and the “necessity” narrative: A case study of Mexico. Geoforum. 2013 Oct 1;49:127–38.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.06.003>
4. Fogarty FS. Medio siglo de cemento en México. 1969. 48 p.
5. Myers IE. Mexico’s Modern Architecture: Arquitectura Moderna Mexicana. Architectural Book Publishing.1952.
6. Le Bourhis E. Glass: Mechanics and Technology. Wiley & Sons; 2014. 416 p.
7. Kou SC, Poon CS. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. Cement and Concrete Composites. 2009 Feb 1;31(2):107–13. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.002>
8. Heriyanto, Pahlevani F, Sahajwalla V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. J Clean Prod. 2018 Aug 1; 191:192–206. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.214>
9. Kong Y, Wang P, Liu S, Zhao G, Peng Y. SEM Analysis of the Interfacial Transition Zone between Cement-Glass Powder Paste and Aggregate of Mortar under Microwave Curing. Materials. 2016 Aug 27;9(9):733. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma9090733>
10. Mirzahosseini M, Riding KA. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). Cement and Concrete Composites. 2015 Feb 1;56:95–105.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.004>
11. Suhendro B. Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. Procedia Engineering. 2014 Jan 1;95:305–320.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.190>

12. Jin R, Chen Q. An investigation of current status of “green” concrete in the construction industry. 2013 Apr 12;1–8.
13. Omran A, Tagnit-Hamou A. Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*. 2016 Apr 15;109:84–95. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006>
14. Lu JX, Poon CS. Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials*. 2018 Jan 30;160:399–407.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.080>
15. Shi C, Jiménez AF, Palomo A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cem Concr Res*. 2011 Jul 1;41(7):750–63. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
16. ASTM C219-20a, Standard Terminology Relating to Hydraulic and Other Inorganic Cements. Disponible en: <https://www.astm.org/c0219-20a.html>
17. Samarakoon MH, Ranjith PG, Rathnaweera TD, Perera MSA. Recent advances in alkaline cement binders: A review. *J Clean Prod*. 2019 Aug 1;227:70–87. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.103>
18. Kamali M, Ghahremaninezhad A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2015 Nov 15;98:407–16. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.010>
19. Jani J, Hogland W. Waste glass in the production of cement and concrete – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014 Sep 1;2(3):1767–1775. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>
20. Santana-Carrillo JL, Ortega-Zavala DE, Burciaga-Díaz O, Escalante-García JI. Modified blended limestone-Portland cement binders: Evaluation of 4 different sodium silicates. *Cement and Concrete Composites*. 2021 Apr 1;118:103935. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103935>
21. ASTM C150/C150M-22, Standard Specification for Portland Cement. Disponible en: https://www.astm.org/c0150_c0150m-22.html
22. ASTM C595/C595M-23, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. Disponible en: https://www.astm.org/c0595_c0595m-23.html
23. Global Cement and Concrete Association. Cement and concrete around the world. Disponible en: <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>

24. Mohamad N, Muthusamy K, Embong R, Kusbiantoro A, Hashim MH. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;48:741–746. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>
25. Cámara Nacional del Cemento. CANACEM. 2022. Disponible en: <https://canacem.org.mx/>
26. Taylor HFW. *Cement Chemistry*. Segunda edición. Thomas Telford; 1997. 488 p.
27. Yu MY, Lee JY, Chung CW. The Application of various indicators for the estimation of carbonation and pH of cement based materials. *J Test Eval*. 2010 Sep 1;38(5):534–540. Disponible en: <https://doi.org/10.1520/JTE102382>
28. ASTM C162-23, Standard Terminology of Glass and Glass Products. Available from: <https://www.astm.org/c0162-23.html>
29. Matos AM, Sousa-Coutinho J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*. 2012 Nov 1;36:205–215. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>
30. Mohajerani A, Vajna J, Cheung THH, Kurmus H, Arulrajah A, Horpibulsuk S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*. 2017 Dec 15;156:443–467. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005>
31. Palomar T, Llorente I. Decay processes of silicate glasses in river and marine aquatic environments. *J Non-Cryst Solids*. 2016 Oct 1;449:20–28. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2016.07.009>
32. Tan KH, Du H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*. 2013 Jan 1;35(1):109–117. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>
33. Gopalakrishnan R, Govindarajan D. Compressive strength and electron paramagnetic resonance studies on waste glass admixed cement. *New J Glas Ceram*. 2011;01(03):119–124. Disponible en: [:10.4236/njgc.2011.13017](https://doi.org/10.4236/njgc.2011.13017)
34. Chow J, Kopp RJ, Portney PR. Energy resources and global development. *Science*. 2003 Nov 28;302(5650):1528–1531. Disponible en: [10.1126/science.1091939](https://doi.org/10.1126/science.1091939)
35. Holmberg K, Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*. 2017 Sep 6;5(3):263–284.

Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>

36. Nidheesh PV, Suresh Kumar M. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. *J Clean Prod.* 2019 Sep 10;231:856–871. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251>
37. Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2017. 2013. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia>
38. ASTM C270-19ae1, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. Disponible en: <https://www.astm.org/c0270-19ae01.html>
39. 116R-90: Cement and Concrete Terminology. American Concrete Institute. Disponible en: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/5077>
40. Turner LK, Collins FG. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials.* 2013 Jun 1;43:125–130. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
41. Miller SA, Horvath A, Monteiro PJM. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability.* 2018 Jan 8;1(1):69–76. Disponible en: [doi:10.1038/s41893-017-0009-5](https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5)
42. 116R-90: Cement and Concrete Terminology. American Concrete Institute. Disponible en: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/5077>
43. ASTM C125-21a, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Disponible en: <https://www.astm.org/c0125-21a.html>
44. ASTM C618-23e1, Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Disponible en: <https://www.astm.org/c0618-23e01.html>
45. Ibrahim S, Meawad A. Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials.* 2018 Sep 10;182:451–458. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.119>
46. Shao Y, Lefort T, Moras S, Rodriguez D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cem Concr Res.* 2000 Jan 1;30(1):91–100. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)

47. Hossain MM, Karim MR, Hasan M, Hossain MK, Zain MF. M. Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. *Construction and Building Materials*. 2016 Jul 30;116:128–140. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.147>
48. Liew KM, Sojobi AO, Zhang LW. Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*. 2017 Dec 15;156:1063–95. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008>
49. Shi X, Xie N, Fortune K, Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Constr Build Mater*. 2012 May;30:125–138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038>
50. Organización de las Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.un.org/en/desa/world-population-reach-8-billion-15-november-2022>
51. The World Bank. [What a Waste](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/). Disponible en: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>
52. Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
53. Sistema nacional de información ambiental y de recursos naturales. Informe de medio ambiente.
Disponible en : <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html>
54. El reciclaje en México. Comercio exterior. Disponible en: http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/757/2/reciclaje_mexico.pdf
55. Shayan A, Xu A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cem Concr Res*. 2004 Jan;34(1):81–89. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5)
56. Vafaei M, Allahverdi A. High strength geopolymer binder based on waste-glass powder. *Adv Powder Technol*. 2017 Jan 1;28(1):215–22.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.09.034>
57. Glass Packaging Institute. Glass Recycling Facts. Disponible en: <https://www.gpi.org/glass-recycling-facts>
58. Afshinnia K, Rangaraju PR. Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali–silica reaction in mortars. *Construction and Building Materials*. 2015 Apr 15;81:257–267. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>

59. United States Environmental Protection Agency. Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling. Disponible en: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/glass-material-specific-data>
60. The European Container Glass Federation. Latest glass packaging recycling rate steady at 76%. FEVE. 2020. Disponible en: https://feve.org/glass_recycling_stats_2018/
61. Chen, Z., Wang, Y., Liao, S., & Huang, Y. Grinding kinetics of waste glass powder and its composite effect as pozzolanic admixture in cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2020 Apr 10;239:117876.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117876>
62. Butler JH, Hooper PD. Glass waste. Academic Press. *Glass Waste*. In: *Waste*. Academic Press; 2019. p. 307–322. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00015-3>
63. Jiang, Y., Ling, T. C., Mo, K. H., & Shi, C. A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. *J Environ Manage*. 2019 Jul 15;242:440–449.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>
64. Shi C, Zheng K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resour Conserv Recycl*. 2007 Dec;52(2):234–247. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>
65. Park SB, Lee BC, Kim JH. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. *Cem Concr Res*. 2004 Dec;34(12):2181–2189. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>
66. Topçu İB, Canbaz M. Properties of concrete containing waste glass. *Cem Concr Res*. 2004 Feb;34(2):267–274. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>
67. Shi C, Wu Y, Riefler C, Wang H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cem Concr Res*. 2005 May;35(5):987–93. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>
68. Abid SR, Ali SH, Kadhum AL, Daek YH. Partial and full replacement of silica sand by fine recycled glass in cementitious composites. *Wasit Journal of engineering Sciences*. 2018 Aug 30;6(2):91–8. Disponible en: <https://www.iasj.net/iasj/download/1e099b38f82bab02>

69. He ZH, Zhan PM, Du SG, Liu BJ, Yuan WB. Creep behavior of concrete containing glass powder. *Composites Part B*. 2019 Jun 1;166:13–20. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.133>
70. Ramakrishnan K, Pugazhmani G, Sripragadeesh R, Muthu D, Venkatasubramanian C. Experimental study on the mechanical and durability properties of concrete with waste glass powder and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2017 Dec 15;156:739–49. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.183>
71. Federico LM, Chidiac SE. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. *Cem Concr Compos*. 2009 Sep;31(8):606–610. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.001>
72. Du H, Tan KH. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017 Jan 1;75:22–29.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>
73. Kamali M, Ghahremaninezhad A. An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. *Construction and Building Materials*. 2016 Jun 1;112:915–924. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.085>
74. Patel D, Shrivastava R, Tiwari RP, Yadav RK. The role of glass powder in concrete with respect to its engineering performances using two closely different particle sizes. *Struct Concr*. 2021 Jan;22(S1). Disponible en: <https://doi.org/10.1002/suco.201900182>
75. Elaqla H, Rustom R. Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste. *Construction and Building Materials*. 2018 Aug 10;179:326–335. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.26>
76. Khmiri A, Chaabouni M, Samet, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. *Construction and Building Materials*. 2013 Jul 1;44:74–80. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>
77. Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cem Concr Compos*. 2011 Jan;33(1):19–29. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>
78. Aliabdo AA, Abd Elmoaty M, Aboshama AY. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*. 2016 Oct 15;124:866–877. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>

79. Anwar A. The influence of waste glass powder as a pozzolanic material in concrete. *Int J Civ Eng Technol.* 2016;7(6):131–48. Disponible en:
<http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=7&IType=6>
80. Omran AF, Etienne D, Harbec D, Tagnit-Hamou A. Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. *Construction and Building Materials.* 2017 Mar 15;135:43–58. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.218>
81. Provis JL. Alkali-activated materials. *Cem Concr Res.* 2018 Dec 1;114:40–48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
82. Torres-Carrasco M, Rodríguez-Puertas C, del Mar Alonso M, Puertas, F. Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour. *Bol Soc Esp Ceram Vidr.* 2015 Mar 1;54(2):45–57.
 Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.03.004>
83. Encyclopedia Britannica. Water glass. 1998. Disponible en:
<https://www.britannica.com/science/water-glass>
84. Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. *Construction and Building Materials.* 2017 May 15;139:342–354. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.071>
85. Samarakoon MH, Ranjith PG, De Silva VRS. Effect of soda-lime glass powder on alkali-activated binders: Rheology, strength and microstructure characterization. *Construction and Building Materials.* 2020 Apr 30;241:118013. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118013>
86. Juenger MC, Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cem Concr Res.* 2015 Dec 1;78:71–80. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
87. Torres-Carrasco, M., Palomo, J. G., & Puertas, F. View of Sodium silicate solutions from dissolution of glasswastes. Statistical analysis. *Materiales de construcción.* 2014. Disponible en:
<https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1470/1706>
88. Menchaca-Ballinas LE, Gorokhovskiy AV, Escalante-Garcia JI. Waste glass as a precursor in sustainable hydraulic cements activated with CaO-NaOH-Na₂CO₃. *Construction and Building Materials.* 2021 Oct 4;302:124099. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124099>

89. Ortega-Zavala DE, Santana-Carrillo JL, Burciaga-Díaz O, Escalante-Garcia JI. An initial study on alkali activated limestone binders. *Cem Concr Res.* 2019 Jun 1;120:267–278. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.002>
90. Menchaca-Ballinas, L. E., & Escalante-García, J. I. Limestone as aggregate and precursor in binders of waste glass activated by CaO and NaOH. *Construction and Building Materials.* 2020 Nov 30;262:120013.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120013>
91. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials.* 2008 Jul 1;22(7):1305–1314. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>
92. García-Lodeiro I, Maltseva O, Palomo Á, Fernández-Jiménez A. Cimenturi hibride alcaline. Partea I: Fundamente*/hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals. *Rev Rom Mater.* 2012;42(4):330. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Ana-Fernandez-Jimenez/publication/285788921_Basic_principles_of_hybrid_alkaline_cements/links/570abaf508ae2eb9421fdcb2/Basic-principles-of-hybrid-alkaline-cements.pdf
93. Castro-Borges P, Balancán-Zapata M, Zozaya-Ortiz A. Electrochemical Meaning of Cumulative Corrosion Rate for Reinforced Concrete in a Tropical Natural Marine Environment. *Advances in Materials Science and Engineering.* 2017 Feb 1;2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2017/6973605>
94. Raupach M. Models for the propagation phase of reinforcement corrosion – an overview. *Mater Corros.* 2006 Aug 1;57(8):605–613.
Disponible en: <https://doi.org/10.1002/maco.200603991>
95. Maldonado L, Pech-Canul MA, Alhassan S. Corrosion of zinc-coated reinforcing bars in tropical humid marine environments. *Anti-Corros Methods Mater.* 2006 Nov 1;53(6):357–61. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/00035590610711697>
96. Mundra S, Criado M, Bernal SA, Provis JL. Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes. *Cem Concr Res.* 2017 Oct 1;100:385–97. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.006>
97. García-González CA., Hidalgo A, Andrade C, Alonso MC, Fraile J, López-Periago AM, Domingo C. Modification of Composition and Microstructure of Portland Cement Pastes as a Result of Natural and Supercritical Carbonation Procedures. 2006 Jun 13; Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ie0603363>

98. Serdar M, Poyet S, L'Hostis V, Bjegović D. Carbonation of low-alkalinity mortars: Influence on corrosion of steel and on mortar microstructure. *Cem Concr Res.* 2017 Nov 1;101:33–45. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.013>
99. Bui H, Boutouil M, Levacher D, Sebaibi N. Evaluation of the influence of accelerated carbonation on the microstructure and mechanical characteristics of coconut fibre-reinforced cementitious matrix. *Journal of Building Engineering.* 2021 Jul 1;39:102269. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102269>
100. Meira GR, Andrade C, Padaratz IJ, Alonso C, Borba JC Jr. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. *Cem Concr Compos.* 2007 Oct;29(9):667–76. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.009>
101. Yu Y, Chen X, Gao W, Wu D, Castel A. Impact of atmospheric marine environment on cementitious materials. *Corros Sci.* 2019 Mar 1;148:366–78. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.12.021>
102. Rissardi CZ, de Souza CFN, Pacheco F, Christ R, Silveira LF. Chloride attack evaluation on concrete compositions according to Brazilian standard ABNT NBR 6118 specification. *J Build Pathol Rehabil.* 2016 Dec;1(1). Disponible en: [10.1007/s41024-016-0004-7](https://doi.org/10.1007/s41024-016-0004-7)
103. Jiang L, Huang G, Xu J, Zhu Y, Mo L. Influence of chloride salt type on threshold level of reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions. *Constr Build Mater.* 2012 May;30:516–521. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.044>
104. Angst U, Elsener B, Larsen CK, Vennesland Ø. Critical chloride content in reinforced concrete — A review. *Cem Concr Res.* 2009 Dec;39(12):1122–1238. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
105. Alonso MC, Sanchez M. Analysis of the variability of chloride threshold values in the literature. *Mater Corros.* 2009 Aug;60(8):631–637. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/maco.200905296>
106. Glass GK, Buenfeld NR. Chloride threshold levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete. 1995. Disponible en: [10.1016/j.corsci.2007.05.007](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.05.007)
107. Andrade C. Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation: Experimental and statistical study. *Electrochim Acta.* 2004 Jul 30;49(17-18):2731–2739. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.034>

108. Li L, Sagüés AA. Chloride Corrosion Threshold of Reinforcing Steel in Alkaline Solutions—Open-Circuit Immersion Tests. *Corrosion*. 2001 Jan 1;57(1):19–28. Disponible en: <https://doi.org/10.5006/1.3290325>
109. Meira, G. R., Andrade, C., Vilar, E. O., & Nery, K. D. Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone. *Construction and Building Materials*. 2014 Mar 31;55:289–298.
- Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.052>
110. Maldonado L, Castro P, Echeverria M. A comparative study of atmospheric corrosion in the Caribbean area. NACE International, Houston; 1995. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/109925>
111. Castro-Borges P, Balancán-Zapata M, López-González A. Analysis of Tools to Evaluate Chloride Threshold for Corrosion Onset of Reinforced Concrete in Tropical Marine Environment of Yucatán, México. *J Chem Chem Eng*. 2012 Oct 23;2013. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2013/208619>
112. Hoil-Canul E, Maldonado-López L, Díaz-Ballote L, Casanova-Calam G. Corrosion of rebars in recycled glass concrete under tropical marine environment. *Materwiss Werksttech*. 2022 Nov;53(11):1410–20. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/mawe.202100133>
113. ASTM C876-22b, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. Disponible en: <https://www.astm.org/c0876-22b.html>
114. ASTM G215-17, Standard Guide for Electrode Potential Measurement. Disponible en: <https://www.astm.org/g0215-17.html>
115. Recomendaciones técnicas. Recomendaciones sobre potenciales de corrosión. Disponible en: <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-02-potencialdecorrosion>
116. Broomfield JP. Corrosion rate measurements in reinforced concrete structures by a linear polarization device. In: *SP-151: Concrete Bridges In Aggressive Environments*. American Concrete Institute; 1994. p. 163–82. Disponible en: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/4348>
117. Recomendaciones técnicas. Recomendaciones sobre velocidad de corrosión. Disponible en: <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-03-velocidaddecorrosion>
118. Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED. DURAR.1998. 208 p.

119. ASTM E11-22, Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves. Disponible en: <https://www.astm.org/e0011-22.html>
120. ASTM C128-22, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Disponible en: <https://www.astm.org/c0128-22.html>
121. ASTM C33/C33M-23, Standard Specification for Concrete Aggregates. Disponible en: https://www.astm.org/c0033_c0033m-23.html
122. ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Disponible en: https://www.astm.org/c0136_c0136m-19.html
123. ASTM C70-20, Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate. Disponible en: <https://www.astm.org/c0070-20.html>
124. ASTM C70-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Disponible en: https://www.astm.org/c0039_c0039m-23.html
125. ASTM D1411-09, Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes (Withdrawn 2018). Disponible en: <https://www.astm.org/d1411-09.html>
126. ISO 9223:2012. Corrosion of metal and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation. 2022. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/53499.html>
127. Elaqla HA, Abou Haloub MA, Rustom RN .Effect of new mixing method of glass powder as cement replacement on mechanical behavior of concrete. Construction and Building Materials. 2019 Apr 10;203:75–82.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.077>
128. Rao NV, Meena T. A review on carbonation study in concrete. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing; 2017. p. 032011. Disponible en: [0.1088/1757-899X/263/3/032011](https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032011)
129. Peng, L, Zhao Y, Ban J, Wang Y, Shen P, Lu JX, Poon CS. Enhancing the corrosion resistance of recycled aggregate concrete by incorporating waste glass powder. Cement and Concrete Composites. 2023 Mar 1;137:104909. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104909>
130. Abdelli HE, Mokrani L, Kennouche S, de Aguiar JLB. Utilization of waste glass in the improvement of concrete performance: A mini review. Waste Manag Res. 2020 Jul 16; Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X20941090>

131. Yoo DY, Lee Y, You I, Banthia N, Zi G. Utilization of liquid crystal display (LCD) glass waste in concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*. 2022 Jul 1;130:104542. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104542>
132. Menchaca-Ballinas LE, Escalante-Garcia JI. Low CO2 emission cements of waste glass activated by CaO and NaOH. *J Clean Prod*. 2019 Dec 1;239:117992. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117992>
133. Avila-López U, Almanza-Robles JM, Escalante-García JI. Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods. *Construction and Building Materials*. 2015 May 1;82:296–303. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.085>
134. Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials*. 2016 Oct 30;125:600–12. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.073>