



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**EVALUACIÓN DEL CURADO INTERNO EN CONCRETOS DE
ALTO DESEMPEÑO**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Con opción terminal en Construcción

Presenta:

Ing. Humberto Fuentes Lozano



Índice

.....	I
Introducción	III
Problemática de investigación.....	V
Justificación	VIII
Antecedentes	X
Objetivos.....	XI
Objetivo general.....	XI
Objetivos específicos	XI
Hipótesis	XII
Marco contextual.....	XIII
Capítulo 1. Marco teórico	1
1.1 Curado del concreto.....	1
1.2 Curado interno	3
1.2.1 Polímeros súper absorbentes	6
1.3 ¿Qué es la durabilidad en el concreto?	7
1.4 Concretos de alto desempeño	9
1.5 Materiales cementantes suplementarios	10
1.5.1 Ceniza Volante	11
1.5.2 Micro Sílice	13
1.5.3 Escoria de Alto Horno	14
1.6 Agua en el concreto	14
Capítulo 2. Metodología experimental de los concretos de alto desempeño	16
2.1 Materiales	16
2.1.1 Cemento Portland Compuesto.....	16
2.1.2 Agregados	18
2.1.3 Aditivos.....	20
2.1.4 Materiales cementantes suplementarios	20
2.1.5 Polímero	23
Capítulo 3. Elaboración de mezclas de concreto de alto desempeño.....	24
3.1 Preparación de las mezclas en laboratorio.....	24
3.2 Diseño de mezclas de concretos de alto desempeño	25

3.2.1 Resumen de las mezclas	27
3.3 Permeabilidad al ion cloruro.....	28
3.4 Muestreo: Concreto en estado fresco.	30
3.4.1 Revenimiento.....	31
3.4.2 Masa unitaria	32
3.4.3 Contenido de aire	33
3.5 Resistividad eléctrica del concreto	33
Capítulo 4. Evaluación de los concretos de alto desempeño.....	35
4.1 Propiedades en estado fresco.....	35
4.2 Propiedades en estado endurecido.....	38
4.3 Indicadores de durabilidad	40
4.3.1 Análisis de resistividad eléctrica	41
4.3.2 Análisis de permeabilidad al ion cloruro	44
Conclusiones	51
Referencias.....	55
Anexos.....	1

Introducción

La durabilidad del concreto en México ha presentado un gran cambio en los últimos años, debido principalmente a los nuevos retos ingenieriles que se han tenido, tomando como ejemplo el cancelado Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, la variabilidad y complejidad de la construcción en ambientes agresivos nos ha replanteado el cómo debemos elaborar el concreto para que pueda subsistir y mejorar su vida útil al menor costo posible.

La resistencia a compresión ha sido la prueba insignia y un indicador de que tan durable es un concreto, pero hoy en día se ha hecho más evidente que no es así.

Actualmente en México existen las normas NMX-C-155-ONNCCE-2014 y NMX-C-530-ONNCCE-2018 que nos especifican parámetros de diseño del concreto conforme al grado de exposición. Sin embargo, se identifican ciertas diferencias en las especificaciones de dichas normas, en el caso de la norma NMX-C-530 clasifica el concreto en: simple, reforzado y presforzado, mientras que la otra no lo hace y sólo habla del concreto en general.

Otro ejemplo es el tipo de prueba como requisito de diseño de durabilidad, en la NMX-C-155 la relación agua / cemento máxima es de 0.40 para clases de exposición 4d (ambiente marino zona de salpicadura) y 5d (ambiente de agresividad química muy alta) y permeabilidad máxima al ion cloruro de 1000 Coulombs, por otra parte la norma NMX-C-530, mantiene la misma relación agua / cemento máxima de 0.40 para elementos de concreto reforzado, pero especifica una resistividad húmeda mínima de 60 k Ω ·cm. En resumen, se sugiere utilizar relaciones agua / cemento máximo de 0.40 y derivado de esto se ha seleccionado el realizar las dos pruebas de durabilidad mencionadas en las normas anteriores: permeabilidad al ion cloruro y resistividad eléctrica en húmedo. Una relación agua / cemento de 0.40 o menor es propia de un concreto de alto desempeño.

En este trabajo se presentarán los resultados de las pruebas de laboratorio a diferentes tipos de concretos de alto desempeño; en estado fresco como revenimiento, masa unitaria, contenido de aire, rendimiento volumétrico, y en estado endurecido como resistencia a compresión, resistividad eléctrica y permeabilidad

rápida al ion cloruro a través de las normas mexicanas, cómo para el segundo caso de estudio no se cuenta con una norma mexicana utilizaremos la norma ASTM C-1202-17a Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

Se evaluarán mezclas con diferentes materiales usados comúnmente en diseños por durabilidad como lo son: micro sílica, ceniza volante, escoria granulada de alto horno para corroborar con materiales que pretenden ser una solución a este problema como un impermeabilizante a base de cristales y el curado interno, producto de este estudio, así como una prueba denominada testigo en donde se empleará sólo relación agua cemento para poder evaluar su comportamiento y de esta forma determinar si el agente auto hidratable genera variantes en el aspecto de durabilidad.

Problemática de investigación

Durante 10 años se ha podido observar que el curado interno por medio de adiciones ha surgido como una nueva tecnología para el concreto con el propósito de mejorar la resistencia al agrietamiento cuando este se encuentra en estado plástico (Cemex, 2011).

El diseño de mezclas es un proceso en el cual se debe lograr un balance entre las especificaciones solicitadas y la economía. Por lo tanto, el uso de aditivos y/o adiciones especiales para control de agrietamiento está controlado al tema económico de las obras.

Sin embargo, cuando no se aplica un curado correcto, la reacción química del cemento se suspende por falta de humedad necesaria, de modo que el concreto no desarrolla las características para el que fue diseñado.

La tecnología de curado interno nos permite dosificar una adición en polvo desde la elaboración del concreto, en consecuencia, el concreto llegando al elemento a colarse ya cuenta con un curado para que se siga desarrollando y evite agrietamientos.

El American Concrete Institute (ACI) en el reporte 116R denominado "Terminología del cemento y del concreto" define el curado como "acción tomada para mantener humedad y condiciones de temperatura en un lugar fresco de mezcla cementante para permitir la hidratación del cemento hidráulico y, si aplica, que ocurran reacciones puzolánicas, así que las propiedades potenciales de la mezcla puedan desarrollarse" (American Concrete Institute, 2002).

De igual manera, el curado según ACI 308 R es "el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor" (American Concrete Institute, 2011).

Los avances en la tecnología del concreto durante los últimos años han llevado al uso práctico de concreto con una baja relación agua / cementantes. Con respecto a este punto, (Kovler & Jensen, 2005) mencionan que desafortunadamente los concretos con baja relación agua / cementantes son propensos al agrietamiento

temprano a menos que se tomen precauciones especiales. Además, retoman que la razón principal de ello es la contracción autógena.

En los últimos años he trabajado en visitar obras de construcción, en donde he observado inadecuadas prácticas de curado por usos y costumbres, siendo el curado del concreto es un proceso fundamental del cual todo constructor tiene conocimiento, pero pocas veces realiza en obra, dando como resultado que las tazas de agrietamiento en las obras sean altas, causas que de acuerdo con mi experiencia se podrían enumerar de la siguiente manera:

En el día a día las construcciones en México son objeto de inadecuadas prácticas de curado por usos y costumbres. De acuerdo con mi experiencia se podrían enumerar de la siguiente manera:

- a) desconocimiento del constructor: como el empleo de incorrectos mecanismos de construcción derivado de usos y costumbres en la construcción.
- b) reducción de costos: ya que por cuestiones económicas se asocia a la compra de algún producto gravoso como lo son las membranas de curado que al no incluirse tienen una mayor probabilidad de agrietamiento plástico.
- c) uso insuficiente o inadecuada colocación de membranas.

De manera explícita, las prácticas inadecuadas en el curado del concreto forman grietas y porosidad en la matriz de la pasta, a través de las cuales, por medio de difusión, capilaridad u otras formas pueden ingresar agentes agresivos tales como iones cloro, sulfatos, dióxido de carbono, ácidos, sales etc., que se encuentran presentes en el medio ambiente reduciendo la durabilidad del concreto, resultando necesario prolongar la vida útil del concreto.

Es importante resaltar que el curado en las estructuras de concreto no debería ser opcional, debe estar especificado y su cumplimiento debería ser supervisado, pero sobre todo debe ser retribuido económicamente, ya que el pago es una de las principales razones para descuidar su ejecución (Sika, 2009).

El curado es la forma más económica y eficaz para garantizar que una obra de concreto sea durable, sin embargo, al no realizarse incidimos en bajar la calidad de nuestras construcciones. En un principio, las propiedades físico-mecánicas se asociaban a la durabilidad del concreto, pero las recientes experiencias prácticas han demostrado que son factores muy importantes más no fundamentales para la obtención de un concreto durable. (Sika, 2009)

Actualmente, existen varias formas de curar el concreto que pueden ser desde regar agua sobre su superficie, reducir la pérdida de agua al recubrir el concreto con algún plástico o membrana y el incluir el método de curado interno. Neville en 1998 comenta que “los principales problemas que se pueden presentar en el curado superficial del concreto es el flujo lento al cual circula el agua al entrar al concreto y le evaporación del fluido en la superficie” (Neville A. , *Concreting technology / an essential element of structural design*, 1998).

A mediados de la década de 1990, una variedad de grupos de investigación en Alemania (Weber & Reinhardt, 1995) en los Países Bajos (van Breugel & de Vries, 1998) e Israel (Bentur, Igarishi & Klover, 1999) han investigado activamente el curado interno mediante el uso de agregados ligeros prehumedecidos. En años posteriores, otros materiales que podrían funcionar como depósitos internos de agua como los polímeros super absorbentes (Jensen & Hansen, 2001) han sido estudiados y en México ya es conocido como un producto comercial.

Es preciso tener certeza respecto a que el curado interno funciona en la densificación de la matriz del concreto como principal función. Es por esto, que resulta relevante analizar esta práctica y sentar bases proponiendo al curado interno como aporte a las propiedades de durabilidad en los concretos de alto desempeño.

Por todo lo anterior podemos decir que el curado interno es un método eficaz y sencillo de aplicar, ya que se coloca directamente en el concreto antes de llegar a obra, por lo tanto, el constructor podrá tener un proceso constructivo desde su colocación, ya que el curado no sólo influye en la resistencia final del concreto, sino que disminuye la permeabilidad y mejora la resistencia al ingreso de gases que pueden causar corrosión.

Con los argumentos anteriores nos permiten preguntarnos *¿el curado interno puede proporcionar mayor resistencia a la migración de iones cloruro en los concretos de alto desempeño a comparación de concretos con materiales cementantes suplementarios?*

Finalmente diremos que: las propiedades del concreto en aspectos de durabilidad son evaluadas por medio de pruebas de migración de iones cloruro, pero actualmente en México no existe una norma que describa el procedimiento, por lo que se opta por retomar el método americano C-1202-17a Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

Justificación

El concreto es uno de los materiales más usados en el mundo, tanto que la producción de concreto se ha duplicado desde 1990 (Mobasher, 2008), lo que lo hace indispensable en la sociedad actual por su costo y durabilidad. Dado que, la vida útil del concreto es un componente primordial, el curado interno puede brindar características adicionales de durabilidad desde su colocación.

Cabe mencionar que, en los últimos años, la tecnología de curado interno ha estado progresando de los laboratorios a la construcción en sitio. Sin aporte de curado extra los concretos de alto desempeño con poca agua por su origen de baja relación agua – cemento tenderán a auto desecarse, es decir, quedarse sin agua para la hidratación del cemento, lo que contribuye a un posible agrietamiento.

También, podríamos afirmar que todos los concretos se agrietan razón por la cual se diseñan con un control de agrietamiento y técnicas para reducirlo. El agrietamiento temprano del concreto es un fenómeno bien conocido que puede afectar seriamente el servicio de vida de las estructuras de concreto de alto desempeño.

Por tal motivo, la importancia de las contracciones en el interior del concreto ha sido subestimada en el pasado, pero ahora es ampliamente aceptado que la contracción autógena es un caso importante para la formación de grietas en concretos de alto desempeño con relaciones agua cemento menores a 0.40. (Gjorv,

2014) plantea que los procesos constructivos inadecuados en la colocación dan lugar a la creación de grietas y porosidad, por las cuales por medio de difusión puede ocurrir el ingreso de agentes agresivos como los sulfatos y cloruros.

De todo lo anterior, podemos decir que el curado es fundamental para asegurar la calidad del concreto. Los métodos tradicionales forma directa son rociando o inundando con agua el elemento, protegiéndolo con algún material para mantener atrapada el agua o con agentes químicos que ofrecen protección al elemento.

(Durán Herrera, 2020) estudió los resultados con curado interno por medio de polímero super absorbente en donde se mejora la contracción autógena y la resistividad eléctrica superficial, aunque, no se ha realizado un estudio con estas características para la revisión de durabilidad por medio de la migración de los iones cloruros.

El curado interno pretende ser un método complementario al curado tradicional, el American Concrete Institute lo explica como “suministrar agua a través de una mezcla cementicia recién colocada, utilizando depósitos a través de agregados ligeros pre humedecidos, que liberan agua fácilmente según sea necesario para la hidratación o para reemplazar la humedad pérdida por evaporación o auto desecación”.

Sin embargo, en general las técnicas de curado no se aplican, por lo consiguiente, el curado interno aún es más desconocido para la mayoría de los constructores. Aunque, en particular, en los concretos de alto desempeño el curado es un método primordial si queremos mantener a la estructura con la durabilidad a la que fue diseñada.

Lo que pretende la propuesta de investigación es demostrar que, con este método, adicional a su principal ventaja que es el curado, se puede garantizar un mejor resultado en durabilidad que un concreto de alto desempeño sin curado interno.

Antecedentes

Antiguamente se tenía el pensamiento que los agregados tenían poca influencia en el concreto, ya que no intervenían en las reacciones químicas, aunque es el material con mayor participación dentro de la mezcla, pero en los últimos años (Chan Yan, Solís Carcaño, & Moreno, 2003) plantean que se tiene la certeza que es una parte fundamental por sus características como resistencia, propiedades elásticas, térmicas, peso volumétrico y su durabilidad.

A mediados de la década de 1990 una variedad de investigadores en Alemania (Weber y Reinhardt, 1995) y en Israel (Bentur, Igarishi y Klover, 1999), había seguido el comentario de Robert Philleo, investigando el curado interno mediante el uso de agregados ligeros pre humedecidos. En los siguientes años, otros materiales han funcionado como depósitos de agua en el interior del concreto, como los polímeros super absorbentes.

“Se debe cambiar la naturaleza básica del cemento Portland para que se reduzca la auto desecación, o se debe encontrar una manera de llevar el agua de curado al interior de los miembros estructurales de alta resistencia”, pensamiento que sugería desde 1991 un visionario del tema y que no podría estar más en lo cierto” (Philleo, 1991)

Al igual que con muchas tecnologías nuevas, el traslado del conocimiento de la investigación teórica a la aplicación en los laboratorios u obras es lento, pero a partir de los 2010 (año que llegó esta tecnología al país), cientos de miles de metros cúbicos de concreto en México han sido colocados con esta tecnología.

Objetivos

Objetivo general

Con el propósito de direccionar la propuesta y diseñar metas alcanzables que permitan responder las interrogantes presentadas, a continuación, se presenta el objetivo principal de la investigación:

- Evaluar la efectividad de la tecnología de curado interno con distintas mezclas de concreto de alto desempeño de relación agua cemento 0.40 empleando combinaciones de un impermeabilizante a base de cristales, micro sílica, ceniza volante y escoria de alto horno para disminuir la permeabilidad a la entrada de ion sulfatos y/o cloruros, para con esto determinar la efectividad del curado interno en la durabilidad de los concretos de alto desempeño.

Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo central de este trabajo se proponen los siguientes objetivos particulares, que, trabajados de manera sistemática, nos ayudarán a determinar la eficiencia de las propiedades de durabilidad en los concretos de alto desempeño y de esta manera evaluar la efectividad del curado interno:

- Elaborar mezclas de concreto en laboratorio, empleando diferentes materiales que comúnmente se conocen como materiales cementantes suplementarios que aportan en la durabilidad del concreto, considerando un método de diseño de mezclas estadístico con los materiales de la región de la ciudad de Puebla para realizar el análisis.
- Evaluar el producto de curado interno con la prueba C-1202-17a Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- Determinar las propiedades mecánicas de resistencia a compresión del concreto a diferentes edades (3, 7, 14, 28 y 56 días).
- Evaluar la resistividad eléctrica húmeda, que comúnmente es una prueba comparativa con la permeabilidad al ion cloruro.

- Realizar el análisis de los resultados de las pruebas obtenidas en concreto fresco y endurecido, así como determinar la efectividad del curado interno.

Hipótesis

Las estructuras de concreto existentes en el país se ven afectadas por las condiciones del medio en que están ubicadas. Con la tecnología existente se pueden diseñar mezclas de concreto suficientemente durables para elementos estructurales que permitan minimizar los costos de mantenimiento y ahorros en reparación.

El uso de un aditivo como el polímero súper absorbente en conjunto con el uso de una baja relación agua / cemento, mitigará la contracción autógena de la matriz del concreto, en consecuencia, densificará y disminuirá la permeabilidad, incrementando la durabilidad del concreto base cemento portland compuesto resistente a los sulfatos.

Marco contextual

La industrial de la construcción atrae una gran cantidad de inversión privada y pública en México, esto lo hace uno de los sectores económicos más importantes. Este sector es un indicador clave en el desarrollo de un país, ya que proporciona desde insumos de otras industrias como el acero y el cemento, hasta construcciones para el bienestar de la sociedad, como escuelas y hospitales.

Las mezclas de concreto son uno de los temas importantes actualmente en la industria, ya que a través de una planificación sensata y conceptos de diseño de mezclas adecuados los elementos de concreto pueden diseñarse para ser duraderos, por eso una buena calidad; no es una especificación particular o alguna propiedad especial, más bien, es un conjunto de actividades que van desde el diseño de la mezcla, correcto proceso constructivo, así como un diseño estructural acorde al elemento a colar.

Por tal motivo, la calidad es un tema de vital importancia para la construcción, esto es, contar con materiales y productos que cumplan con las normas mexicanas, así como realizar procesos constructivos que sigan manteniendo la calidad de estos en las obras. El concreto bueno o malo, ha sido el material de construcción más usado en el último siglo, no existe ningún competidor económicamente viable a la vista, por lo tanto, podemos esperar que el concreto de alto desempeño o buen concreto, siga sirviendo por un largo tiempo, (Neville A. , *Concreting technology / an essential element of structural design*, 1998).

Esto puede ser resultado de la nula evaluación que se tiene en las obras, ya que la mayoría de éstas son del sector privado y no se tiene una regulación sobre ellas, y en el caso de las obras de sector público donde se cuenta con entidades que evalúan la calidad de los productos, las pruebas siguen siendo primarias como el revenimiento y el ensaye a compresión además de los actos de corrupción en la supervisión y control de obras.

Otro tema importante son los procesos después del vaciado del concreto en donde no se tiene una norma por cumplir y existen especificaciones, por ejemplo: el curado del concreto, que muchas veces son desconocidas por el constructor.

La importancia de este último tema está limitada principalmente al concreto de la zona del recubrimiento, pero las consecuencias de un curado inadecuado son importantes. No tiene caso tener un concreto muy bueno en el interior de un miembro estructural cuando el recubrimiento de concreto del refuerzo es de pobre calidad, de modo que la carbonatación del concreto se extiende rápidamente a través del espesor de la zona de recubrimiento, o los cloruros o sulfatos penetran desde el exterior en el concreto, derivado de esto, la importancia de un curado desde el interior (P. Aïtcin, A.M. Neville y P. Acker, 1997).

La microestructura de la zona entre la pasta del cemento y el agregado depende en gran medida de la naturaleza del agregado, específicamente de su porosidad y absorción de agua. Se ha observado que los agregados ligeros con una capa superficial porosa producen una microestructura densa, que es equivalente a la pasta de cemento, a diferencia de las regiones porosas de agregados normales (Dale P Bentz, 2009).

Como resumen final podríamos decir que el curado es fundamental para la calidad que se espera del concreto y es por ello por lo que ante la falta de reglamentación e inclusive de información al constructor que le motive a realizar este proceso con rigurosidad nos vemos alentados a presentar un estudio que analice, el uso de un polímero super absorbente que puede proporcionar un curado interno; y evitar el ingreso de cualquier agente químico para el concreto.

Capítulo 1. Marco teórico

El concreto es un material conocido por la mayoría de las personas en el mundo, desde las casas donde vivimos hasta los proyectos más grandes de infraestructura de cualquier país han requerido en alguna proporción el uso de este. Por tal motivo, es importante realizar concretos de alto desempeño que no sólo cubran las especificaciones de uso común, sino que nos brinden características de durabilidad para poder tener estructuras más resistentes y de mejor comportamiento.

El diseño de mezclas de concreto es una parte importante de la durabilidad, pero esta siempre debe ir acompañada de un proceso constructivo correcto para seguir con la calidad del concreto. Esta línea de investigación nos llevará a explorar diferentes tipos de curado interno y relacionar su comportamiento con base en el desempeño. Por tal motivo, se ahondará en las pruebas de laboratorio para evaluar la resistencia mecánica de los concretos con los diferentes tipos de curado interno y la prueba estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones de cloruro, conocida comúnmente como RCPT.

1.1 Curado del concreto

“El curado es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico, madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor”, (American Concrete Institute, 2011)

Curar el concreto es garantizar la humedad y temperatura óptimas necesarias hasta que los poros de cemento, originalmente llenos de agua, sean reemplazados por la hidratación del cemento, para que se desarrolle su resistencia, evitando el agrietamiento interno, de lo contrario el concreto será vulnerable a la entrada de agentes agresivos reduciendo severamente su durabilidad.

Para que en el concreto se produzcan la mayoría de los procesos físicos y químicos se necesita agua. El concreto tiene una cierta cantidad de agua en su

elaboración, que es mayor a la necesitada en el mezclado y mayor de la que debe retener en el proceso de curado. No obstante, la hidratación sólo es posible en un espacio saturado y, si existe la pérdida excesiva de agua por evaporación, esto puede ocasionar que el agua sea menor a la necesaria, este efecto es derivado de la temperatura del aire, humedad relativa del lugar del colado, la temperatura del concreto y velocidad del aire, (Sika, 2009).

Cuando exista una evaporación excesiva ocurrirá una desecación del concreto donde la hidratación será incompleta y es una causa frecuente de grietas plásticas y por consiguiente una pérdida de resistencia. Por el contrario, cuando exista suficiente agua, “el cemento seguirá hidratándose hasta que todos los poros disponibles se vean saturados con la hidratación o hasta que no haya más cemento por hidratar, la resistencia y durabilidad dependen fundamentalmente del grado de porosidad de la matriz del concreto” (Powers, 1948, p. 6).

La temperatura ambiente es un factor importante para el curado, entre más baja sea esta el curado puede ser más lento y en algunas ocasiones nulo, pero entre más alta el curado debe ser constante e indispensable. “La temperatura se debe controlar para evitar la congelación del concreto hasta que este desarrolle una resistencia a la compresión de por lo menos 35 kg/cm²” (Powers, 1962, p. 7).

La rapidez de hidratación del cemento depende de la temperatura del concreto, para lograr que el concreto fragüe es necesario contar con una temperatura de al menos 5 °C, a menor temperatura los procesos de hidratación, fraguado y resistencia se ven retardados, por el contrario, en climas cálidos estos procesos se aceleran.

Se estima que el clima frío es “cuando la temperatura del aire ha descendido de los 4 °C durante el tiempo de protección” (ACI 306, 2016, p.5), estas medidas se deben incrementar conforme la temperatura desciende para evitar el daño en el concreto por congelamiento en edades tempranas, asegurar que el concreto continúe con su desarrollo de resistencia, limitar los cambios bruscos de temperatura y mantener las condiciones de curado.

El clima caliente, por lo regular, ocasiona problemas en el curado del concreto que pueden afectar las propiedades de servicio. Uno de ellos es debido a la rapidez

de hidratación del cemento que depende de la temperatura ambiental y la del concreto. El segundo es el aumento en la velocidad de evaporación de humedad del concreto fresco, tasa de evaporación, por lo tanto, en días de colado con temperaturas altas las medidas de precaución en los procesos constructivos deben ser más estrictas.

El tener un control de temperatura del concreto en climas cálidos controla el tiempo de fraguado el agrietamiento por contracción plástica, contracción por choque térmico y la contracción por secado. Sin embargo, no es suficiente, ya que la colocación dependerá de factores como la mayor pérdida de revenimiento y el cuidado de no aplicar agua en obra, juntas frías y el incremento en la rapidez del fraguado que pueda ocasionar una mala compactación o acabado.

1.2 Curado interno

El concreto de alto desempeño normalmente tiene relaciones agua – cemento bajas que no pueden suministrar suficiente agua para hidratar el cemento. Debido a la reducción de la permeabilidad, el curado externo tradicional tiene una capacidad limitada para proporcionar una hidratación a la matriz, por tal motivo, el curado externo se limita a curar la superficie del concreto.

El tener agua en el interior de la matriz conduce a mayor hidratación del cemento y mayor interacción con las puzolanas. El concreto curado internamente utiliza materiales super absorbentes en la mezcla que complementa el curado aportando humedad al interior de la matriz. (Bentz & Weiss, 2010).

Dada la importancia del agua de curado y la dificultad de proveerla desde el exterior en concretos de alto desempeño, la idea es proveer agua desde el interior del concreto cobra una especial importancia, (Weber & Reinhardt, 1997).

Conforme a (American Concrete Institute, 2002) “El curado interno consiste en suministrar agua a través de una mezcla de concreto utilizando depósitos, por medio de agregados ligeros pre humedecidos que liberan agua según sea necesario para la hidratación”. Esta definición nos arroja los principales objetivos del curado interno: maximizar la hidratación y minimizar la auto desecación.

(Bentz & Weiss, 2010) plantean que el objetivo del curado interno es proporcionar una fuente de agua adicional fácilmente disponible para que la porosidad capilar de la pasta de cemento hidratante permanezca saturada, minimizando así las tensiones y deformaciones autógenas.

Figura 1

Curado de concreto con aserrín



Elaboración propia para la investigación. (Fuentes Lozano 2023)

Cómo se ve en las figuras 1, 2, 3 y 4 existen en el mercado diferentes sistemas de curado para ser ocupados en obra o aditivos de curado interno para mezclarse directamente en el concreto, siendo el más aplicado en la industria del concreto el polímero super absorbente, el cual es capaz de retener mayor tiempo la humedad dentro del concreto y generar una liberación controlada necesaria para una mejor hidratación del cemento portland.

Figura 2

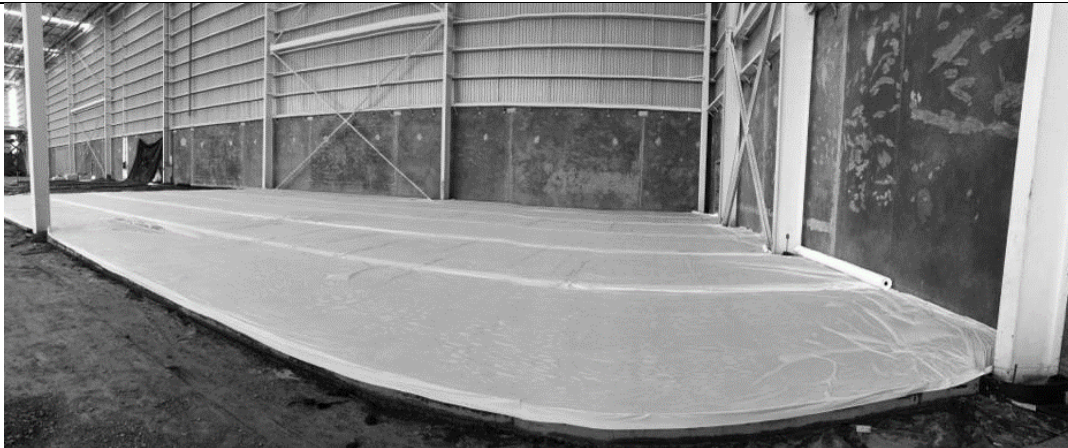
Curado de concreto con membrana de curado



Elaboración propia para la investigación. (Fuentes Lozano 2023)

Figura 3

Curado de concreto mediante retención de humedad con plásticos



Elaboración propia para la investigación. (Fuentes Lozano 2023)

Figura 4

Curado de concreto mediante vapor



Elaboración propia para la investigación. (Fuentes Lozano 2023)

1.2.1 Polímeros súper absorbentes

Los polímeros súper absorbentes tienen aplicaciones en la industria de la higiene infantil, pañales para bebés, y en los últimos años esta tecnología ha llegado al concreto por su capacidad de absorber y retener agua. Los polímeros súper absorbentes también pueden ser utilizados para modificar la reología del concreto, en este trabajo el enfoque está dado para el curado interno, es decir, mitigar la contracción autógena en pastas de cemento.

Durante la elaboración de la mezcla de concreto, el polímero absorberá agua de la mezcla, así formará inclusiones llenas de agua, útiles para el curado interno (Snoeck, Jensen, & De Beile, 2015), el agua liberada debido a la autodesecación durante la hidratación del cemento se puede utilizar para una mayor hidratación y reducción de la contracción autógena (Schröfl, Mechtcherine, & Gorges, 2012).

El agua presente en el polímero súper absorbente será liberada hacia la matriz cementosa debido a la inminente caída de la humedad relativa, (Snoeck, Jensen, & De Beile, 2015).

1.3 ¿Qué es la durabilidad en el concreto?

Como punto de partida, podemos mencionar que “la durabilidad del concreto es la habilidad para resistir la acción del intemperismo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, sin perder sus propiedades” (ACI 201, 2001, p. 2).

Tomando como base estas condiciones, Uribe Afif (2000), menciona “que la expectativa de mejorar la durabilidad y, por lo tanto, la vida útil de cualquier estructura está dada por la definición de sus condiciones de exposición, condiciones de servicio y las prácticas recomendadas en la construcción del elemento”.

El concreto por su naturaleza y antigüedad es uno de los materiales más durables en la construcción y de menor mantenimiento en comparación con otros materiales. Sin embargo, el decir que el concreto es un material durable, predeterminadamente quiere decir que tiene una calidad adecuada, esto incluye en su elaboración, procesos constructivos y curado.

La permeabilidad del concreto es una propiedad que está vinculada a diversos factores, pero una pregunta que nos podemos hacer es ¿Cómo hacemos estructuras menos permeables y duraderas? La respuesta no es única, si no está compuesta por diversos factores y protagonistas.

1. Relación agua / cemento: Es la división de la cantidad de agua efectiva, es decir, la diferencia de agua total presente en el concreto y el agua absorbida por los agregados, entre el contenido de cemento por m^3 . Conforme a (Abrams, 2018) es la relación inversamente proporcional de la resistencia del concreto.
2. Curado del concreto.
3. Tipo de cemento.
4. Relación grava / arena.
5. Aditivos para concreto.

Se suelen considerar cuatro compuestos como los componentes principales del cemento. Según (Neville A. M., 1999) describe “cada oxido como una letra: CaO

= C, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. Análogamente, el H_2O del cemento hidratado, se indica por una H”.

El hidróxido de calcio es producto de la reacción de los silicatos con el agua, el resultado de esta reacción es la formación de Silicato de Calcio Hidratado, este nuevo producto en la matriz disminuye la porosidad, por lo tanto, podemos considerar al cemento como un silicato cálcico hidratado S-C-H.

La durabilidad del concreto también se encuentra asociado a la química del cemento ocupado, la estructura física de los productos de hidratación es un claro ejemplo. Según (Neville A. M., 1999) “en cualquier etapa de hidratación, la pasta endurecida consta de hidratos no bien cristalizados, denominados colectivamente como gel, de cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, algunos componentes menores, cemento no hidratado y residuos de los espacios rellenos de agua en la pasta”. Estos vacíos se denominan poros capilares, por lo tanto, en una pasta deshidratada existen dos tipos de gel: partículas de gel y poros de gel.

La diversidad de regiones y su gran extensión litoral con que cuenta nuestro país nos han empezado a generar retos ingenieriles cada vez más grandes y sobre todo evaluar la rentabilidad de los proyectos. El uso de materiales reciclados y sobre todo el ahorro del construir con un costo inicial mayor, pero a futuro ahorros considerables, se ha vuelto un tema de vanguardia en México.

(American Concrete Institute, 2017) define la vida útil de las estructuras como “el periodo de tiempo después de la instalación, en el que el desempeño de la estructura cumple los valores mínimos de mantenimiento”.

Los factores que afectan la durabilidad del concreto tienen diversas circunstancias, (Hernández Castañeda & Mendoza Escobedo, 2006) plantean clasificarlas por los agentes que dañan el concreto: los externos como los iones cloruro, el dióxido de carbono y sulfatos, y los internos como los álcalis del cemento.

Conforme a la NMX-C-155-ONNCCE-2014 se puede clasificar por su origen, como pueden ser físicos, ciclos de congelamiento y deshielo, químicos como los ataques

por sulfatos, ácidos y cloruros y mecánicos, los cuales se deben a las condiciones que se expone el concreto como: abrasión y erosión.

1.4 Concretos de alto desempeño

El concreto sigue elaborándose hoy como la mayoría de las personas que han estado en alguna obra lo conocen: cemento, grava, arena y agua, sin embargo, el uso de nuevos materiales son los que nos dan nuevos tipos de mezclas como: aditivos químicos, adiciones y fibras

En las décadas pasadas, los cementos comerciales se molían más gruesos que ahora, y los reductores de agua que ofrecía el mercado en su mayoría estaba hecho a partir de lignosulfonatos. Estos lignosulfonatos variaban mucho en su composición y provocaban problemas cuando se ocupaban en grandes dosis como la inclusión de aire y retardo de fraguado del concreto. Fue a finales de la década de 1960 que los superplastificantes se utilizaron por primera vez en el concreto; su introducción ocurrió casi de forma simultánea en Japón y en Alemania (Meyer 1981, Hattori 1981).

En los últimos años el desarrollo tecnológico ha sido exponencial en todas las ramas, en el caso del concreto, el mayor desarrollo está dado en la formulación, elaboración y disponibilidad de los aditivos químicos para concreto, en especial en los reductores de agua de alto rango que nos ha permitido tener una revolución para mejorar la relación agua / cemento de los concreto pasando de 0.75-0.40 hasta 0.25.

Sin embargo, la reducción en la relación agua / cemento nos ha traído propiedades mucho más importantes a señalar, como la reducción poros capilares y poros totales de la pasta, lo cual nos elabora un material mucho más denso y homogéneo, impactando directamente en las propiedades de permeabilidad y resistencia del concreto.

Hablar del concreto y sus materiales puede ser redundante, ya que la mayoría de las personas que están en el medio de la construcción conoce los componentes con los que se elabora, sin embargo, es importante entender cómo podemos realizar concretos más durables.

Al respecto, Neville y Aitcin (1998) mencionan “que el concreto de alto desempeño no es fundamentalmente diferente a un concreto normal, porque no contiene un ingrediente nuevo”. Entonces, ¿Cuál es la diferencia entre el concreto de alto desempeño y el concreto usual? La calidad de los materiales.

La selección de los ingredientes es crítica porque requiere de un conocimiento experto tanto teórico como práctico para establecer su eficiente compatibilidad tanto en laboratorio como en obra.

El American Concrete Institute (ACI) por medio de su comité en Concreto de Alto Comportamiento lo define en términos cualitativos, como “un concreto que cumple con requerimientos especiales de comportamiento que no siempre pueden ser alcanzados rutinariamente usando sólo constituyentes convencionales y procedimientos normales de colado y curado”.

1.5 Materiales cementantes suplementarios

Desde la década de los 90's, varias investigaciones comenzaron a recomendar la utilización de materiales cementantes suplementarios, (Dhir & Jones, 1994) plantean el uso de materiales cementantes suplementarios debido a la capacidad de ser un aglutinante en el concreto, por lo cual puede sustituirse parcialmente en las mezclas.

Según (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004) “Los materiales cementantes suplementarios se adicionan al concreto como parte del sistema cementante. Se les puede utilizar como adición o sustitución parcial del cemento portland”.

Los materiales cementantes suplementarios son materiales muy finos que son incorporados a las mezclas de concreto en diferentes cantidades para dos propósitos:

- 1.- Mejorar las propiedades de durabilidad en el concreto.
- 2.- Como materiales puzolánicos para eficientar el uso de cemento portland.

El uso de los materiales adicionantes como son la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice y las puzolanas naturales, generan muchos beneficios en el comportamiento del concreto hidráulico ya que, además de mejorar las propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido, su uso impacta positivamente al ambiente y al ahorro en el consumo de energía, (Uribe Afif, 2017).

Los materiales anteriormente mencionados se clasifican como materiales cementantes suplementarios o aditivos minerales; la mayoría son subproductos de procesos industriales que no tienen un uso establecido y muchas veces, se consideran como desechos del proceso; sin embargo, se les ha encontrado un uso importante en la industria de la construcción y, específicamente, en la elaboración de concreto hidráulico. Esto porque, aunque su uso es relativamente reciente, las mejoras que se logran en el concreto son importantes, (Uribe Afif, 2017).

1.5.1 Ceniza Volante

Conforme a la (ASTM, Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón C618, 2019) indica los requisitos químicos que debe de cumplir los materiales suplementarios como la ceniza volante de carbón y la puzolana natural cruda.

Según la (ASTM, Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón C618, 2019), la clasificación de las cenizas o puzolanas será la siguiente:

Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas como tierras diatomáceas, sílex opalino y esquistos, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas volcánicas calcinadas o no calcinadas y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y esquistos.

Clase F: Cenizas volantes normalmente producidas por la quema de antracita o carbón bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

Clase C: Cenizas volantes normalmente producidas a partir de lignito o carbón sub-bituminoso. Esta clase de ceniza volante, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

Los requisitos químicos y físicos que requiere cumplir la ceniza volante se enuncian en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Requisitos químicos ceniza volante

		Clase N	Clase F	Clase C
	Dióxido de Silicio (SiO ₂)			
Suma Total	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	70,0	50,0	50,0
	Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)			
	Trióxido de azufre (SO ₃), máx%	4,0	5,0	5,0
	Contenido de humedad, máx %	3,0	3,0	3,0
	Pérdida en ignición, máx %	10,0	6,0	6,0

Elaboración propia con datos de: (ASTM, Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón C618, 2019)

Tabla 2. Requisitos físicos ceniza volante

		Clase N	Clase F	Clase C
Resistencia	Con cemento portland a 7			
índice de	días, mín % de control	75,0	75,0	75,0
actividad	Con cemento portland a			
puzolánica	28 días, mín % de control	75,0	75,0	75,0
	Sanidad, expansión o contracción en			
	autoclave, máx %	0,8	0,8	0,8

Elaboración propia fuente: (ASTM, Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón C618, 2019)

1.5.2 Micro Sílice

Conforme a (ASTM, Especificación Normalizada para Humo de sílice Utilizado en Mezclas Cementicias C1240, 2005) se define al humo de sílice como “material puzolánico muy fino, compuesto mayormente de sílice amorfo producido por hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio elemental o aleaciones de hierro-silicio (conocidas como humo de sílice condensado y micro sílice).

Este material reacciona químicamente con el hidróxido de calcio en la pasta del cemento, lo cual produce un gel de hidrato de silicato de calcio que mejora significativamente la resistencia y sobre todo la durabilidad del concreto. Por su alta finura, mayor a la del cemento, la micro sílice llena el vacío entre partículas de cemento creando un concreto más denso y menos permeable.

Tabla 3. *Requisitos químicos micro sílice*

Composición química	Especificación
SiO ₂ , mín %	85,0
Contenido de humedad, máx %	3,0
Pérdida por ignición, máx %	6,0

Elaboración propia con datos de: (ASTM, Especificación Normalizada para Humo de sílice Utilizado en Mezclas Cementicias C1240, 2005)

Tabla 4. *Requisitos físicos micro sílice*

Composición química	Especificación
Retenido en malla 45 micras, máx %	10,0
Resistencia puzolánica acelerada, índice de actividad (7 días), mín %	105,0
Superficie específica, mín, m ² /g	15,0

Elaboración propia con datos de: (ASTM, Especificación Normalizada para Humo de sílice Utilizado en Mezclas Cementicias C1240, 2005).

1.5.3 Escoria de Alto Horno

La escoria de alto horno se forma a partir de la manufactura del hierro, en el pasado se utilizaban para la elaboración de diferentes cementos, que eran comúnmente conocidos como cementos siderúrgicos. De acuerdo con (Puertas, 2012) “las escorias siderúrgicas de alto horno son el resultado de la combinación de la ganga ácida (arcillosa) del material de hierro y de las cenizas de azufre del coque (igualmente de carácter ácido) con la cal y la magnesia”.

Conforme a la norma ASTM C 595 “la escoria de alto horno es un material no metálico, constituido principalmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio que se desarrollan simultáneamente con el acero en el alto horno” (ASTM, Especificación normalizada para cementos adicionados hidráulicos C595, 2008)

1.6 Agua en el concreto

El agua es un material demasiado importante en el proceso del concreto, empieza en la elaboración y continúa en el curado. El comité 116 del American Concrete Institute define agua de mezclado “como el agua presente en concreto en estado fresco en adición a cualquier agua absorbida por el agregado” (American Concrete Institute, 2002).

Esta agua primero llena los espacios entre las partículas sólidas (materiales cementicios y agregados) y después crea una película entre ellas que las separa. Este último efecto lubricante es lo que hace una mezcla trabajable, (Mindess, Young, & Darwin, 2003).

Una vez que el agua de mezclado y los materiales cementicios entran en contacto, diferentes reacciones químicas empiezan.

El agua que era originalmente agua de mezclado se transforma en diferentes tipos de agua a medida que la hidratación ocurre. Parte del agua pasa a estar químicamente combinada en el principal compuesto que otorga resistencia al hormigón, silicatos de calcio hidratados. Otra parte del agua es adsorbida en

la superficie de los productos de hidratación y la otra parte queda atrapada en los poros capilares originados durante la hidratación. Dichos capilares se forman debido a que el volumen de los productos de hidratación es menor que el volumen de los materiales previos a la hidratación, (Neville A. , An examination of issues in concrete practice, 2003).

Capítulo 2. Metodología experimental de los concretos de alto desempeño

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de los materiales ocupados en las mezclas de concretos de alto desempeño, los resultados son compartidos por el proveedor realizado por sus laboratorios o laboratorios subcontratados que se encuentran acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación, dándonos la certeza de que el procedimiento se encuentra apegado a las normas.

2.1 Materiales

A continuación, se hace una descripción breve, sin llegar a profundizar en los materiales empleados en las mezclas de concreto elaboradas y tomando como referencia los datos aportados por el proveedor (cemento, adiciones y aditivos) y las pruebas realizadas en laboratorio (agregados).

El agua utilizada proviene de un pozo cercano al laboratorio y es de uso potable.

2.1.1 Cemento Portland Compuesto

Cemento Portland Compuesto 40 RS conforme a la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 de marca Fortaleza de planta Tula, el cual tiene la característica especial de Resistente a los Sulfatos que cumple como tipo V conforme a la norma ASTM C150. La densidad del cemento es enviada por el proveedor mensualmente, por lo tanto, se toma el promedio de los últimos tres meses arrojando 3.05 kg/cm^3 .

Tabla 5*Composición química del cemento utilizado*

Compuesto		Cemento CPC 40 RS (% en peso)
Pruebas Químicas	SiO ₂ - Sílice	18.30
	Al ₂ O ₃ – Alúmina	4.80
	Fe ₂ O ₃ - Oxido férrico	4.00
	CaO - Cal combinada	62.80
	CaO - Cal libre	0.80
	MgO – Magnesio	0.90
	SO ₃ - Trióxido de azufre	3.40
	P ₂ O ₅ - Penta óxido de fósforo	0.09
	Na ₂ O - Oxido de sodio	0.49
	K ₂ O - Oxido de potasio	0.58
	C ₃ S - Silicato tricálcico	65.8
	C ₂ S - Silicato di cálcico	2.14
	C ₃ A - Aluminato tricálcico	5.96
	C ₄ AF - Ferro aluminato Tetra cálcico	12.16
	Superficie específica, Blaine	3480 cm ² /g
Pruebas Físicas	Sanidad: Expansión o contracción en autoclave	-0.021
	Finura en % que pasa 32 mm	97.1
	Relación A/C	50.6
	Fluidez	108

Elaboración propia con datos de: (Cementos Fortaleza, 2023)

Conforme a la composición química del cemento podemos observar que la cantidad de Al₂O₃ es menor al 5%, por lo que cumple como un cemento resistente a los sulfatos y según (Torres Acosta, Moreno Valdés, Lomelí González, Martínez Madrid,

& Díaz Cruz, 2018) “es importante restringir el uso de cementos con una finura no menor de 380 m²/kg; ya que la reactividad de los aditivos químicos reductores de agua de alto rango es mermada si se utilizan cementos o adiciones más gruesos”. El Blaine (finura) del cemento utilizado es de 348 m²/kg.

2.1.2 Agregados

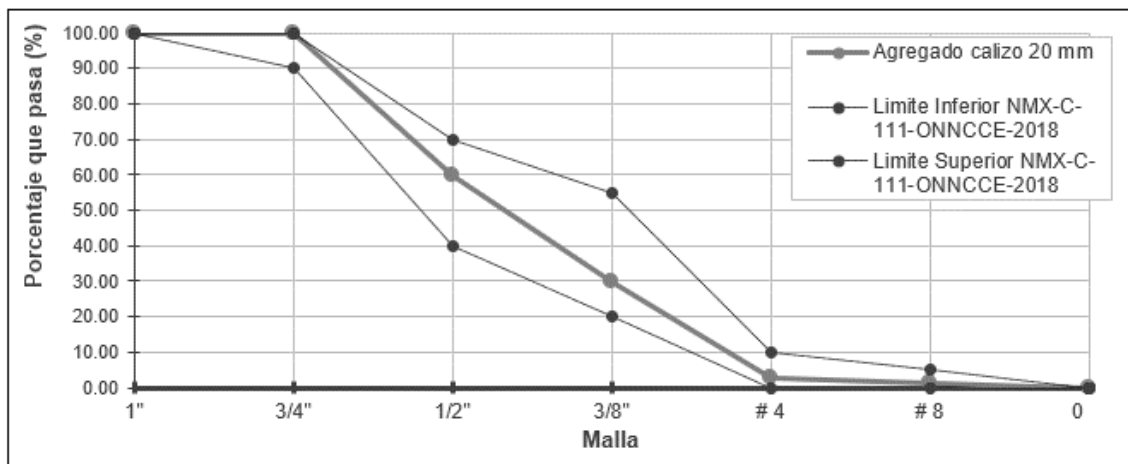
Durante este trabajo se ocuparon dos tipos de agregados para la elaboración de las mezclas de concreto. A continuación, se describirá su caracterización.

El agregado grueso es de tipo calizo, uso común en la región de la ciudad de Puebla, del banco Imisa con un tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4”). La granulometría es obtenida conforme a la norma NMX-C-077-ONNCCE-2019. A continuación, se muestra la granulometría con sus propiedades recomendadas:

Figura 5

Límites granulométricos agregado grueso caliza 20 mm

Grava GRC20 TMA 20



Elaboración propia con datos obtenidos de pruebas de laboratorio agosto 2023

Se obtuvo densidad y absorción de la grava para realizar el diseño de la mezcla por medio de la norma NMX-C-164-ONNCCE-2024 y de la arena mediante la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014. Los pesos volumétricos de ambos materiales son

obtenidos mediante la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004 en suelto, así como pérdida por lavado en el caso de la arena.

Tabla 6.

Características físicas de los agregados

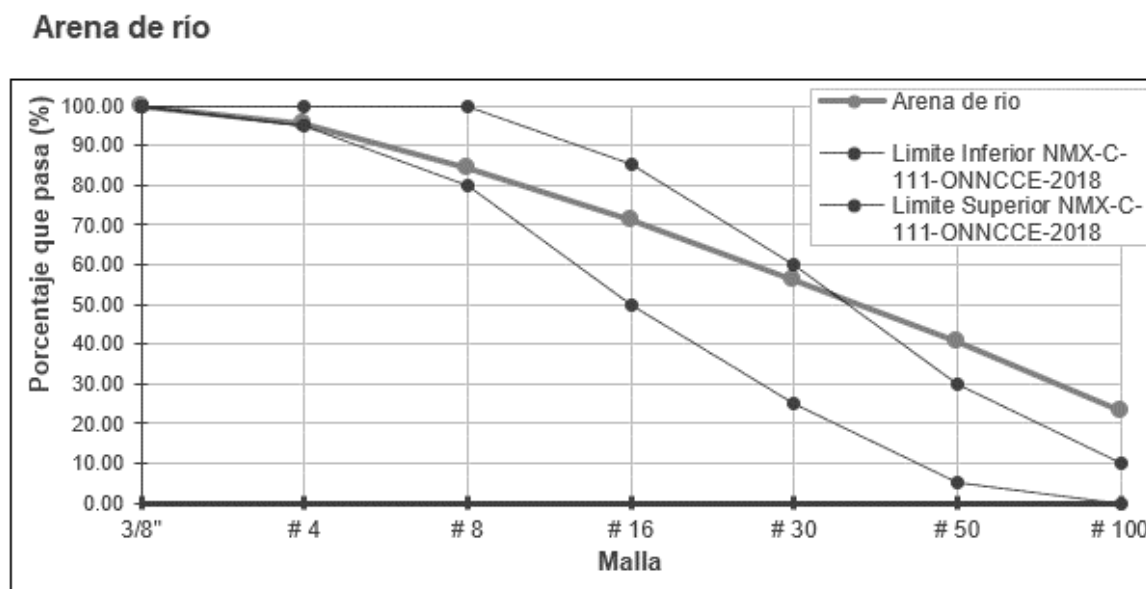
Agregado	Peso volumétrico (kg/m³)	Densidad (kg/m³)	Absorción (%)
Grava caliza	1 350	2 652	0.75
Arena de río	1 364	2 520	3.85

Elaboración propia con datos obtenidos de pruebas de laboratorio agosto 2023.

El agregado fino es de origen de río, sin ningún tratamiento sólo es cribado en el banco. La granulometría es obtenida conforme a la norma NMX-C-077-ONNCCE-2019.

Figura 6.

Límites granulométricos de arena



Elaboración propia con datos obtenidos de pruebas de laboratorio agosto 2023

2.1.3 Aditivos

Durante este trabajo se ocuparon dos tipos de aditivos, uno es un lignosulfato de la marca Element5 con nombre comercial WRA-10, esto con el fin de tener permanencia del concreto. El segundo es un aditivo base policarboxilato que es empleado como reductor de agua de alto rango para obtener concretos con relaciones agua cemento menores o iguales a 0.40 y nombre comercial E5-Ultra.

Conforme al (American Concrete Institute, 2010) las adiciones de impermeabilizantes a base de cristalización tienen inmensos beneficios en la permeabilidad del concreto, por lo cual, se decidió ocupar un aditivo hidrofóbico cristalino en polvo de la marca Kryton conocido como KIM.

2.1.4 Materiales cementantes suplementarios

Son materiales puzolánicos artificiales, subproductos industriales que su uso impacta positivamente en el ambiente y en el ahorro de consumo de energía. Se obtuvieron diferentes materiales que conocemos teórica y experimentalmente que son ocupados en concretos donde la durabilidad es un parámetro.

2.1.4.1 Ceniza Volante

La Ceniza Volante ocupada en esta investigación es proveniente de la central termoeléctrica Petacalco, Guerrero, la cual no contiene ningún tipo de aditivo y/o activación, es una ceniza tipo F conforme a la norma ASTM C 618 y relacionando los resultados obtenidos con los requisitos químicos y físicos de las tablas 1 y 2.

Entre las propiedades físicas de la ceniza, esta tiene una masa volumétrica suelta (M.V.S.) de 1012 kg/m³ y una masa volumétrica compactada (M.V.C.) de 1093 kg/m³. Esto se determinó con base en el procedimiento estipulado en la norma NMX-C-073/ASTM C-29.

Tabla 7*Resultados de la muestra de ceniza volante ensayada*

Requisitos químicos	Resultado %	Especificación		
		Clase N %	Clase F %	Clase C %
Dióxido de Silicio (SiO ₂) + óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) + óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃), mín %	88,9	70	70	50
Trióxido de Azufre (SO ₃), máx. %	0,6	4,0	5,0	5,0
Pérdida por calcinación, máx. %	3,4	10,0	6,0	6,0
Humedad, máx. %	0,004	3,0	3,0	3,0
Álcalis disponibles (Na ₂ O)	1,8		N/A	
Requisitos físicos				
Índice de actividad puzolánica a 28 días, mín.%	75,1	75	75	75
Expansión en autoclave, máx. %	0,00	0,8	0,8	0,8

Elaboración propia con datos de: (IMCYC, 2019)

2.1.4.2 Micro sílica

La micro sílica utilizada es del proveedor Eucomex, un subproducto de la industria de las aleaciones de hierro, como el ferrosilíceo. A continuación, se presentan los datos aportados por el proveedor.

Tabla 8*Información técnica de micro sílica*

Requisito	Especificación
Densidad a granel	644 kg/m ³
Contenido de micro sílica	100 %
SiO ₂ amorfo	92-98%

Elaboración propia con datos de: (Euclid Chemical)

Derivado de la composición química de la micro sílica podemos observar que contiene un porcentaje de SiO₂ de casi un 95% y otros óxidos en cantidades menores.

2.1.4.3 Escoria granulada de alto horno

La escoria granulada de alta horno ocupada en este trabajo es del proveedor Villacero, por los comentarios de su personal, no se encuentra activada. En la siguiente tabla podemos observar sus principales características químicas.

Tabla 9

Composición química principal de la escoria granulada de alto horno

Componente químico	Si	Mn	Al	V	N	Fe
Resultado	0.35 %	0.34 %	0.081%	0.08 %	0.01 %	98.85 %

Elaboración propia con datos de: (Villacero)

Figura 7

Materiales suplementarios utilizados en la elaboración de mezclas.



Materiales utilizados, de arriba abajo e izquierda a derecha: Microsilica, impermeabilizante a base de cristales, polímero, ceniza volante y escoria granulada de alto horno. Elaboración propia Fuentes Lozano 2023.

2.1.5 Polímero

El polímero utilizado para este trabajo es del proveedor INNSO, con una estructura química de poliacrilamida de red entrecruzada.

La dosificación se realiza con base a las características de la mezcla, dependiendo de la cantidad total de agua por m³ es la dosificación requerida conforme al proveedor, en este caso se aplicará 250 gramos por m³.

Tabla 10

Características físicas del polímero súper absorbente

Tamaño de la partícula	< 0.5 mm
Carácter iónico:	Anionico
Contenido de humedad:	10%
Densidad aproximada:	0.89 g/cm ³
Máxima absorción:	En agua desionizada 663 g/g
Tiempo para alcanzar el 60% de su capacidad de absorción	20 minutos
Tiempo de liberación total a una temperatura de 40 °C al aire libre	12 horas

Elaboración propia con datos de: (INNSO, 2018)

Capítulo 3. Elaboración de mezclas de concreto de alto desempeño

En este capítulo se presenta el programa experimental el cual fue diseñado para llevar a cabo la ejecución de los objetivos general y específicos de esta investigación.

El objetivo del diseño de la mezcla es utilizar materiales para desarrollar un concreto que se pueda mezclar, transportar, colocar, consolidar y terminar en estado fresco y bombear sí es requerido, controlar el sangrado y minimizar la contracción en estado endurecido, y cuando se cure adecuadamente obtener una baja permeabilidad.

Este programa se encuentra conformado por una serie de pruebas que permitieron evaluar el comportamiento mecánico, de durabilidad y de trabajabilidad que presentó el concreto con curado interno.

Aunque los concretos elaborados para este trabajo son con fines de investigación, también se podrían producir de manera industrial, por lo tanto, se realizaron con las siguientes características: trabajabilidad, bombeabilidad y permanencia del revenimiento.

3.1 Preparación de las mezclas en laboratorio

Las mezclas son elaboradas el día 19 de septiembre de 2023 en el laboratorio de control de calidad de la empresa Concretos de Alta Tecnología, el cual es un laboratorio acreditado ante EMA y cumple con los requisitos para la elaboración, descimbrado y curado de los especímenes.

Para la elaboración de las mezclas en laboratorio se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Muestreo de los agregados del patio de la planta concretera.
- Homogenizado de los materiales en laboratorio y posterior obtención de la humedad de cada agregado, para poder realizar la corrección por humedad

y no alterar la relación agua / cemento. Se utilizaron cubetas tapadas para guardar la humedad de los materiales.

- Pesado de cada uno de los materiales con báscula de aproximación de 1 gramos calibrada.

Para el mezclado se utilizó una revolvedora de capacidad de 40 litros, no se utilizó un proceso de mezclado tradicional, ya que lo que requerimos en primera instancia es calibrar el punto de utilización de aditivo con la relación agua / cemento 0.40.

3.2 Diseño de mezclas de concretos de alto desempeño

Para empezar con la evaluación de las mezclas, se recabo el material en el laboratorio, en donde se realizaron pruebas para poder calibrar la cantidad de aditivo policarboxilato y mantener la relación agua / cementantes, es decir, se realizó una primera prueba colocando sólo el agua hasta alcanzar una hidratación que nos permitiera colocar el aditivo, después de esto se realizaron 4 pruebas:

1. Se uso sólo aditivo Policarboxilato a 8 cc's con respecto a la recomendación del proveedor, no logrando el revenimiento y aspecto adecuado.
2. Se aumento la dosis a 10 cc's conforme los comentarios del proveedor, pero no alcanzo la fluidez deseada.
3. Se realizó la siguiente prueba a 11.5 cc's de aditivo en donde se alcanzó el revenimiento deseado pero el aspecto lucía segregable, por lo tanto, decidimos realizar otra mezcla con menor dosificación.
4. Prueba a 11 cc's del aditivo policarboxilato, en donde obtuvimos un revenimiento adecuado, aspecto correcto y un buen desempeño, es decir, evaluamos la pérdida de revenimiento en un lapso de 15 minutos con trompo mezclando y el revenimiento se mantenía conforme a un concreto con estas características.

Por lo tanto, se calibró el aditivo a 11 cc's por cada kilogramo de cemento de E5-Ultra para todas las mezclas con relación agua / cemento 0.40.

Los materiales adicionales son dosificados conforme a las recomendaciones de cada proveedor para concretos de alto desempeño, en el caso de los materiales

cementantes suplementarios han sido sustituido el cemento por estos materiales para mantener la relación agua cemento elegida en este proyecto.

Para la evaluación de la efectividad del curado interno, se llevaron a cabo 6 diseños de mezclas, de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 11

Nomenclaturas asignadas a cada tipo de mezcla

Mezcla	Nomenclatura	Descripción
1	PL-49-23- PUE1	Prueba testigo: relación agua / cementante de 0.40
2	PL-50-23- PUE1	Prueba con curado interno por medio de polímero superabsorbente
3	PL-51-23- PUE1	Prueba con impermeabilizante a base de cristales
4	PL-52-23- PUE1	Prueba con micro sílica al 6% con base cemento conforme a la recomendación del proveedor.
5	PL-53-23- PUE1	Prueba con ceniza volante en sustitución 6 % de cemento conforme a la recomendación del proveedor y poder evaluar directamente contra la micro sílica
6	PL-54-23- PUE1	Prueba con escoria granulada de alto horno al 6% con base cemento conforme a la recomendación del proveedor.

Elaboración propia Fuentes Lozano 2023.

El diseño de las mezclas de concreto es por un método estadístico con base en la experiencia de los materiales de la zona de Puebla, el proporcionamiento es por medio de volúmenes absolutos. El revenimiento de diseño es de 22 cm, ya que al ser un concreto con baja relación agua / cementantes tiende a tener un aspecto “pesado”, por lo tanto, para poder colocarlo debe ser fluido sin llegar a la segregación.

Los proporcionamiento de las mezclas en estado saturado superficialmente seco se muestran a continuación:

Tabla 12

Proporcionamiento de mezclas con los agregados en saturado superficialmente seco

Material / Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Cemento (kg)	450	449.75	423	423	423	423
Agua (L)	180	180	180	180	180	180
Grava 20 mm (kg)	897	897	872	872	872	872
Arena (kg)	796	796	774	774	774	774
Aditivo línea (ml)	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Aditivo	4950	4950	4950	4950	4950	4950
Policarboxilato (ml)						
Polímero súper absorbente (kg)	-	0.20	-	-	-	-
Impermeabilizante a base de cristales (kg)	-	-	27	-	-	-
Micro sílica (kg)	-	-		27	-	-
Ceniza volante (kg)	-	-	-	-	27	-
Escoria de alto horno (kg)	-	-	-	-	-	27

Elaboración propia Fuentes Lozano 2023.

3.2.1 Resumen de las mezclas

- Mezcla 1: Se denomina como mezcla testigo, es decir, es la mezcla que nos servirá como parámetro de un concreto de alta resistencia con una relación agua / cementantes de 0.40.

- Mezcla 2: En esta mezcla está basada la hipótesis, es decir, es el concreto con la inclusión de un polímero super absorbente, el cual, conforme a la recomendación del proveedor, la dosis es de 250 gramos por m³.
- Mezcla 3: Mezcla elaborada con 6% de un impermeabilizante a base de cristales el cual es un aditivo que detiene la migración de agua a través del concreto, por lo cual, se ha escogido este tipo de aditivo como comparación de los concretos de alta desempeño. La dosificación es la recomendada por el proveedor para reducir drásticamente la permeabilidad en los concretos.

Las siguientes mezclas, se realizaron con materiales cementantes suplementarios, en los cuales se han desarrollados estudios que reducen la permeabilidad del concreto, por lo cual, al ya conocer estas características, tenemos un testigo (mezcla 1) y mezclas que sí cumplen con el objetivo de durabilidad, por lo tanto, podremos realizar una evaluación entre estos 2 parámetros.

- Mezcla 4: Mezcla elaborada con 6% de micro sílica, es decir, se mantuvo la relación de 0.40 agua / cementantes en donde nos arroja una dosificación de 25.5 kg de micro sílica por m³.
- Mezcla 5: En esta mezcla el proveedor recomendó sustituir hasta un 25% de cemento, pero se decidió utilizar la misma dosificación que la micro sílica para poder evaluar en las mismas condiciones el material, por lo tanto, manteniendo la relación agua / cementantes nos arroja una dosificación de 25.5 kg de ceniza volante por m³.
- Mezcla 6: Se utilizó el mismo concepto de sustitución del 6 % de material cementante, por lo tanto, la dosificación es de 25.5 kg de escoria de alto horno para mantener la relación de 0.40 agua / cementantes.

3.3 Permeabilidad al ion cloruro

Actualmente en México no se cuenta con una norma que describa el procedimiento y nos dé los parámetros de esta prueba, por lo tanto, se ha ocupado la norma ASTM C-1202-17a Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist

Chloride Ion Penetration, más comúnmente conocida como RCPT (rapid chloride permeability test).

(Torres Acosta, Moreno Váldez, Rodríguez Mendo, Lomelí Gonzalez, & Martínez Madrid, 2019) plantean que “el concreto, al igual que el resto de los materiales, posee propiedades que lo identifican y en la actualidad son las propiedades eléctricas las de particular interés”.

A continuación, describiremos la importancia de la prueba que se realiza en laboratorio:

Este método de prueba cubre la determinación de la conductancia eléctrica de concreto para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones cloruro.

El procedimiento de ensayo consiste en el control de la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de rebanadas de 50 mm de espesor de núcleos nominales o cilindros con un diámetro de 100 mm durante un periodo de 6 horas. Una diferencia de potencia de 60 V dc se mantiene a través de los extremos de la muestra, uno de los cuales se sumerge en una solución de cloruro de sodio, el otro es una solución de hidróxido de sodio. La carga total pasada en Coulombs ha demostrado estar relacionada con la resistencia de la muestra a la penetración de iones cloruro.

Tabla 13

Clasificación de la permeabilidad al ion cloruro basado en la carga que pasa.

Carga que pasa (Coulombs)	Penetración ion cloruro
>4 000	Alta
2 000 – 4 000	Moderada
1 000 – 2 000	Baja
100 – 1 000	Muy baja
>100	Despreciable

Elaboración propia con datos de: (ASTM, ASTM C-1202 Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2017).

3.4 Muestreo: Concreto en estado fresco.

El concreto es diseñado en estado saturado superficialmente seco por volúmenes absolutos, es decir, obteniendo la dosificación de los materiales para 1 m³, para el diseño se ocupó un método estadístico respetando la relación agua / cementantes de 0.40. Las adiciones utilizadas son en sustitución de la cantidad de cemento.

Un punto importante es la obtención de las humedades de los agregados en laboratorio, para con esto poder realizar las correcciones por humedad y pesar las cantidades de materiales para mezclas de 35 litros.

Figura 8

Punto de saturación de agua antes de la adición de aditivo



Elaboración propia Fuentes Lozano 2023.

Se elaboran especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm para los ensayos de resistividad eléctrica y permeabilidad al ion cloruro y especímenes cúbicos de 15 x 15 cm para ensayos a compresión. El proceso de mezclado utilizado es dosificar los materiales con el agua hasta el punto de saturación del cemento, antes de dosificar el aditivo.

Es importante recalcar, que los concretos son elaborados en laboratorio, pero con metodología para poder ser producidos de manera industrial, por lo tanto, se utilizó un revenimiento de 22 cm para las mezclas

Las propiedades del concreto en estado fresco son elaboradas inmediatamente después de finalizar el mezclado y obteniendo visualmente un revenimiento acorde al establecido para después obtener la prueba con la finalidad de verificar que las mezclas cumplan con las características adecuadas de diseño.

A continuación, se describen las pruebas realizadas al concreto en estado fresco a cada una de las mezclas elaboradas:

3.4.1 Revenimiento

El propósito de esta prueba es determinar la consistencia del concreto en estado fresco. El revenimiento de las mezclas se llevó a cabo por medio de la norma (ONNCCE, Determinación del revenimiento en el concreto fresco NMX-C-156-ONNCCE-2010, 2010) NMX-C-156-ONNCCE-2010.

Figura 9

Determinación del revenimiento en concretos de alto desempeño



Elaboración propia, fotografía tomada durante las pruebas, Fuentes Lozano 2023.

Está prueba también es fundamental para el consumo de agua, por lo tanto, se estableció un revenimiento de 22 cm para calibrar la dosificación del aditivo policarboxilato.

3.4.2 Masa unitaria

El objetivo de esta prueba es determinar que la cantidad dosificada en kg es la contenida en un m^3 , por lo tanto, podemos tener la seguridad que la mezcla elaborada cumple con el rendimiento volumétrico óptimo de 1000 litros por m^3 .

La prueba es realizada por medio de la norma (ONNCCE, 2014) NMX-C-162-ONNCCE-2014. De acuerdo con las NTC de la Ciudad de México, un concreto clase I debe cumplir con un peso por metro cúbico mínimo de 2 200 kg/m^3 , con los agregados de la región de Puebla cumplimos con este objetivo, adicional, al controlar la cantidad de agua dosificada, el peso volumétrico mínimo esperado es mayor a 2 300 kg/m^3 .

Figura 10

Determinación de la masa unitaria en concretos de alto desempeño



Elaboración propia fotografía tomada durante la toma de muestras Fuentes Lozano 2023

3.4.3 Contenido de aire

Esta prueba es elaborada conforme a la norma (ONNCCE, Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión, 2006) NMX-C-157-ONNCCE-2006, se obtiene esta prueba con la finalidad de determinar el contenido de aire inducido como atrapado en el concreto.

Se ocupó un contenido de aire teórico de 1.5% para el diseño inicial, después de la primera corrida para ajuste de aditivo se tomó 1.2% conforme a la primera prueba, en las demás pruebas con materiales cementantes suplementarios, al conocer que la ceniza volante y la micro sílica incrementan el aire de la mezcla se supuso 1.5% para el diseño, pero después es corregido conforme al resultado de la prueba.

3.5 Resistividad eléctrica del concreto

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto es la patología que más afecta la vida útil de estas. Un método cualitativo para valorar el estado de deterioro por corrosión de una estructura es la resistividad eléctrica. Esta prueba es elaborada conforme a la norma (ONNCCE, NMX-C-514-ONNCCE-2019 Resistividad Eléctrica del concreto hidraulico, 2019) NMX-C-514-ONNCCE-2019.

Conforme a (ONNCCE, NMX-C-514-ONNCCE-2019 Resistividad Eléctrica del concreto hidraulico, 2019) la resistividad eléctrica “es una propiedad eléctrica de los materiales que mide la capacidad del material para oponerse al flujo de una corriente eléctrica y corresponde al recíproco de su conductividad”, su unidad de medida es el ohm – cm.

En los últimos años el uso de pruebas de resistividad eléctrica ha ganado popularidad en lugar de la prueba RCPT debido a que es una prueba no destructiva más sencilla de realizar (Gudimettla & Crawford, 2016).

Tabla 14

Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto

Resistividad kΩ·cm	Probabilidad de corrosión
>100 - 200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo.
50 - 100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo.
10 - 50	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido.
<10	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido.

Elaboración propia con datos de: (ONNCCE, NMX-C-514-ONNCCE-2019 Resistividad Eléctrica del concreto hidráulico, 2019)

Capítulo 4. Evaluación de los concretos de alto desempeño

En este capítulo se muestran los resultados de los ensayos del concreto en estado endurecido, así como su interpretación conforme a las edades de ensaye.

Las mezclas de concreto fueron elaboradas conforme al cronograma de la tabla 15, en donde se indican las edades a las cuales fueron ensayados los especímenes.

Tabla 15

Cronograma de ensayos de mezclas de alto desempeño en estado endurecido.

Fecha / Pruebas al concreto endurecido	Ensaye a compresión de especímenes cúbicos de 15 x 15 cm	Ensaye de especímenes a resistividad eléctrica	Ensaye de especímenes para RCPT
Ensaye a 3 días (22 de septiembre 2023)	✓	✗	✗
Ensaye a 7 días (26 de septiembre 2023)	✓	✗	✗
Ensaye a 14 días (03 de octubre de 2023)	✓	✗	✗
Ensaye a 28 días (17 de octubre de 2023)	✓	✗	✗
Ensaye a 56 días (14 de noviembre de 2023)	✗	✓	✓
Ensaye a 90 días (18 de diciembre 2023)	✗	✓	✓

Elaboración propia. Bitácora de pruebas de laboratorio de la investigación.

4.1 Propiedades en estado fresco

Las pruebas al concreto en estado fresco se realizaron inmediatamente después de finalizar el mezclado, la prueba de revenimiento es la primera en realizarse para cumplir con el revenimiento de proyecto, con la cual, podemos constatar el uso de

agua y mantener la relación agua cemento de 0.40. Adicionalmente, se ha determinado la consistencia del concreto la cual fue favorable en condiciones de: trabajabilidad y aspecto (que no estuviera segregable).

Figura 11

Trabajabilidad del concreto



Elaboración propia, fotografía tomada durante las pruebas, Fuentes Lozano 2023.

En la tabla 16 se presentan los resultados de las siguientes pruebas realizadas en concreto fresco:

- Determinación del revenimiento en concreto fresco NMX-C-156.
- Determinación de la masa unitaria del concreto fresco NMX-C-162.
- Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión NMX-C-157.
- Determinación de la temperatura del concreto fresco NMX-C-435.

Tabla 16*Resultados de pruebas al concreto en estado fresco.*

Mezcla	Revenimiento (cm)	Masa unitaria (kg/m³)	Contenido de aire (%)	Temperatura del concreto (°C)
PL-049-23- PUE1	23	2 341	1.2	21
PL-050-23- PUE1	23	2 326	1.5	21
PL-051-23- PUE1	23	2 370	1.1	22
PL-052-23- PUE1	22	2 327	1.4	23
PL-053-23- PUE1	23	2 317	1.6	23
PL-054-23- PUE1	22	2 320	1.5	23

Elaboración propia, bitácora de resultados.

La información anterior, demuestra que todas las mezclas lograron el revenimiento de diseño, el cual es de 22 cm. Los resultados de contenido de aire y masa unitaria señalan algunas características por la sustitución de material como grava y arena en lugar de los materiales suplementarios.

Además, podemos observar que en la mezcla que contiene el polímero el contenido de aire incremento 0.3% con respecto al testigo y la masa unitaria disminuyo 15 kg/m³, aunque se realizó la corrección en el diseño debido a las diferentes densidades entre el polímero y la arena ya que se incrementó el contenido de aire debido a los vacíos que incorpora el polímero.

Otro dato a retomar es que el impermeabilizante a base de cristales fue el que menor contenido de aire presentó, esto se confirma con la masa unitaria que es la mayor de todas las mezclas.

Por último, la mezcla que presentó mayor contenido de aire es la realizada con ceniza volante, que también presentó un aumento en el revenimiento por 1 cm. Este comportamiento de mayor fluidez puede ser atribuido a la forma de las partículas de la ceniza volante en combinación de la trabajabilidad que otorga este material en combinación con el aditivo policarboxilato.

4.2 Propiedades en estado endurecido

La resistencia a compresión de los concretos fue medida a las edades de: 3, 7, 14 y 28 días. A continuación, se presentan los resultados en la tabla 17:

Tabla 17

Resultados a compresión en especímenes cúbicos de 15 x 15 cm

Identificación mezcla / Edad de ensaye	3 días (kg/cm²)	7 días (kg/cm²)	14 días (kg/cm²)	28 días (kg/cm²)
Mezcla 1 – Testigo	447	517	536	592
Mezcla 2 – polímero súper absorbente	448	503	535	580
Mezcla 3 – impermeabilizante a base de cristales	450	462	518	596
Mezcla 4 – Micro sílica	453	468	531	579
Mezcla 5 – Ceniza volante	515	529	553	598

Mezcla 6 – 478 507 533 557

Escoria granulada
de alto horno

Elaboración propia, bitácora de resultados.

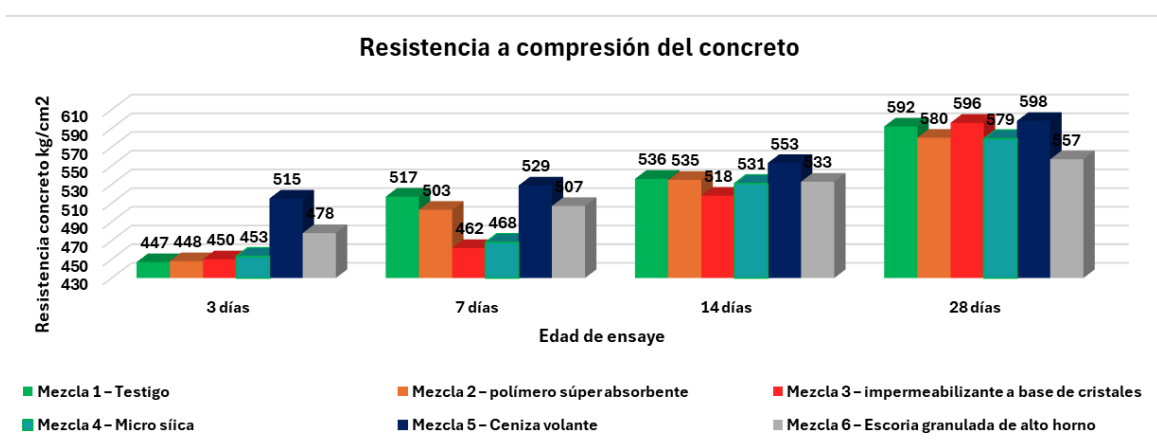
Con el análisis de los datos anteriores, se determina que el concreto con mayor resistencia mecánica es la mezcla 5 con inclusión de ceniza volante 6 kg/cm² por arriba del testigo sin adiciones.

También, podemos determinar que el testigo es mayor por 12 kg/cm² que la propuesta con el polímero super absorbente, de igual manera esto es constatado con la demanda de agua del polímero para que pueda funcionar.

Asimismo, se percata que la mezcla con menor resistencia es la 6, con inclusión de escoria granulada. Un aspecto a resaltar, es que el material no es activado por el proveedor, bajando la temperatura bruscamente al momento de obtenerla, por lo que podemos considerar como inerte su valor para resistencia, pero no para durabilidad.

Figura 12

Gráfica de resistencia de mezclas de laboratorio



Elaboración propia con datos obtenidos de las pruebas durante la evaluación de las mezclas.

4.3 Indicadores de durabilidad

En la actualidad, el responsable del diseño de estructuras de concreto debe tomar la durabilidad como un papel fundamental para proponer una especificación, para que así, el diseñador de la mezcla de concreto tenga la oportunidad de considerar diversos factores como lo son: el ambiente que estará expuesta la estructura y los materiales a utilizar.

(Andrade, 2004) concluye que sólo los métodos que miden directamente el transporte de dióxido de carbono o iones cloruro son realistas, por lo tanto, aquí radica la importancia de realizar pruebas correlacionadas a la durabilidad del concreto y no sólo pruebas para evaluar consistencia y resistencia mecánica. De igual manera la evolución de las obras de construcción es muy rápida, derivado de esto, las pruebas deben ser de fácil acceso y menor tiempo posible y/o existir correlaciones entre pruebas, por ejemplo, permeabilidad al ion cloruro y resistividad eléctrica.

La dosificación en las mezclas de concreto que mejoran la resistencia de la corrosión en el acero de refuerzo no debe ser muy diferente a la de un concreto de alto desempeño, por eso se ha escogido este tipo de concretos.

Finalmente, las mezclas realizadas en este trabajo son evaluadas entre sí y no comparadas con otros tipos de concretos denominados convencionales. El objetivo de evaluar las adiciones bajo las mismas condiciones y su desempeño con respecto al testigo es para determinar si el polímero súper absorbente aportará una mejora en las características de los concretos contra materiales suplementarios que la literatura y experiencia conocemos que sí aportan diferentes características.

Conviene resaltar que, el curado de los especímenes para todos los ensayos en concreto endurecido es realizado en una pileta de curado con una humedad del 100 %, y una temperatura de 23 ± 2 °C.

4.3.1 Análisis de resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica en el caso del concreto está relacionada en gran proporción con el grado de saturación de los poros. En esta propuesta, las mediciones de resistividad eléctrica se realizaron con el equipo de medición de resistencia eléctrica marca proceq con una precisión de medida de $\pm 0,2$ a ± 2 k Ω cm y una separación de ondas de 3.8 cm.

Las mediciones realizadas de resistividad en el concreto fueron conforme a la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019.

Figura 13

Medición de resistividad eléctrica



Elaboración propia, fotografía tomada del equipo de medición marca proceq durante las evaluaciones a las mezclas.

La resistividad eléctrica medida conforme a la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019 de una resistividad superficial para cilindros de 10 x 20 cm. Además, la norma propone intervalos de resistividad y velocidad de ingreso de agentes.

De acuerdo con la tabla 14 plasmada en el capítulo anterior, cuando la resistividad es menor de 10 k Ω cm se indica que el concreto tiene una porosidad interconectada

de consideración muy alta, lo que permitirá un transporte de agentes de deterioro hacia el acero extremadamente rápido, y es considerado para relaciones a/c muy altas.

A continuación, se realiza la siguiente interpretación con tipos de concreto y código de colores de los resultados explicitados en la Tabla 18.

Tabla 18

Interpretación de probabilidad de corrosión conforme a la NMX-C-515-ONNCCE-2019

kΩcm	Probabilidad de corrosión	Tipos de concreto	Código de color
<10	Muy alta	Relaciones a/c altas	
10-50	Moderada	Relación a/c 0.40 – 0.50	
50-100	Baja	Relación a/c <0.40	
100-200<	Muy baja	Concretos con Latex	

Elaboración propia, código de color utilizado para graficar resultados.

De igual forma, se presentan los resultados de la resistividad eléctrica en la Tabla 19, que es contemplada a la edad de 56 días de ensaye.

Tabla 19

Resultados promedio de 2 medidas de Resistividad Eléctrica en prueba de laboratorio a 56 días

Mezcla	Resistividad eléctrica kΩcm	Clasificación NMX-C-515	Código de color
PL-049-23-PUE1	11.7	Moderada	
PL-050-23-PUE1	11.6	Moderada	
PL-051-23-PUE1	8.6	Muy alta	
PL-052-23-PUE1	20.8	Moderada	
PL-053-23-PUE1	16.2	Moderada	
PL-054-23-PUE1	11.8	Moderada	

Elaboración propia elaborada con datos a la resistividad eléctrica de las muestras

Se observó un comportamiento diferente en las mezclas elaboradas, podemos observar que la mezcla con mejor desempeño es la PL-052-23-PUE1, la cual es adicionada con micro sílica. Subsecuentemente podemos observar que las mezclas con materiales que conocemos como suplementarios para concretos durables están cumpliendo su función al estar por arriba de un concreto sin adiciones (testigo PL-049-23-PUE1).

Asimismo, observamos que tanto el testigo como el concreto estudiado con polímero super absorbente tienen un resultado muy similar, con 0.1 kΩcm de diferencia entre ellos.

El concreto con menor resistividad eléctrica es el elaborado con el impermeabilizante a base de cristales.

En la Tabla 20 se presentan los resultados de resistividad eléctrica a los 90 días, donde podemos observar que la tendencia incrementa conforme el tiempo es mayor.

Tabla 20

Resultados promedio de 2 medidas de Resistividad Eléctrica en prueba de laboratorio a 90 días

Mezcla	Resistividad eléctrica kΩcm	Clasificación NMX-C-515	Código de color
PL-049-23-PUE1	41.7	Moderada	
PL-050-23-PUE1	37.8	Moderada	
PL-051-23-PUE1	28.5	Muy alta	
PL-052-23-PUE1	64.1	Baja	
PL-053-23-PUE1	61.7	Baja	
PL-054-23-PUE1	42.5	Moderada	

Elaboración propia con la utilización del código de color y resultados a 90 días

En el análisis de los datos, la mezcla PL-052-23-PUE1 es la que presenta mayor resultado de resistividad, en comparación con el testigo sin adiciones es de 22.6 kΩcm, por lo tanto, tiene una porosidad baja, permitiendo que el transporte de agentes sea lento.

El concreto testigo se mantiene con una clasificación moderada, que es normal en concretos con relaciones agua / cemento de 0.40.

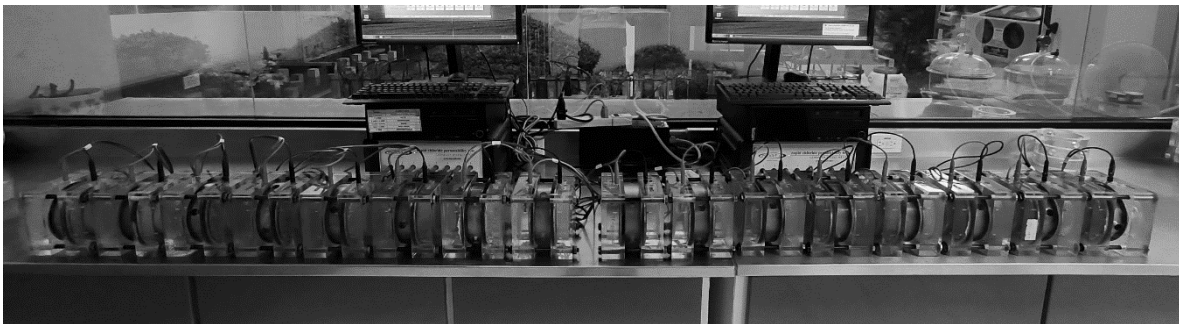
Por último, la propuesta del uso de un polímero super absorbente se encuentra por debajo del testigo en 3.9 kΩcm, por lo que podemos deducir que el curado interno está dejando poros en la matriz del concreto, facilitando el transporte de agentes nocivos al concreto.

4.3.2 Análisis de permeabilidad al ion cloruro

El método de prueba estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones cloruro fue realizada a los 56 y 90 días respectivamente, después de elaboradas las pruebas: 14 de Noviembre de 2023 y 18 de Diciembre 2023.

Figura 14

Rapid Chloride Permeability Test



Elaboración propia, fotografía tomada durante la elaboración de pruebas de laboratorio, Fuentes Lozano 2023.

De acuerdo con (AASHTO TP95, 2011) se ha descubierto a partir de las mismas mezclas de concreto, que la resistividad eléctrica está relacionada con la resistencia a la penetración de iones cloruro y con esto podemos proporcionar una indicación rápida, por lo tanto, la Tabla 21 expuesta a continuación, es adecuada para evaluar materiales y proporciones para el diseño.

Tabla 21

Correlación entre prueba de resistividad eléctrica y penetración al ion cloruro

Penetración al ion cloruro	Cilindros 100-mm x 200-mm
Alta	< 12
Moderada	12 - 21
Baja	21 – 37
Muy baja	37 – 254
Despreciable	> 254

Elaboración propia con datos de: (AASHTO TP95, 2011)

Con esta clasificación podemos determinar que todas las mezclas son de alta calidad, ya que entran a los 90 días en baja o muy baja probabilidad de penetraciones de los iones cloruro, lo cual significa que podemos clasificarlos como concretos durables. Al mismo tiempo, podemos ver el incremento en la densidad, y, por lo tanto, menos poros interconectados en la matriz del concreto.

Lo anterior, se constata con la prueba directa realizada en laboratorio determinada en la Tabla 22 que presenta la determinación de la habilidad del concreto para resistir la penetración al ion cloruro a los 56 días

Tabla 22

Resultados de la determinación de permeabilidad rápida al ion cloruro a 56 días

Mezcla	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Coulombs (C)
PL-049-23-PUE1	100	51	1 750

PL-049-23-PUE1	100	51	1 524
PL-050-23-PUE1	100	50	1 969
PL-050-23-PUE1	100	50	1 977
PL-051-23-PUE1	99	52	2 793
PL-051-23-PUE1	100	51	3 209
PL-052-23-PUE1	100	50	829
PL-052-23-PUE1	100	51	901
PL-053-23-PUE1	100	51	882
PL-053-23-PUE1	100	52	846
PL-054-23-PUE1	100	51	1 349
PL-054-23-PUE1	100	50	1 607

Elaboración propia, bitácora de resultados a 56 días.

De las muestras ensayadas a 56 días podemos observar que el testigo en promedio tiene una lectura de 1 657 Coulombs, así que, se puede clasificar como una muestra de concreto con una penetración de iones cloruros, baja.

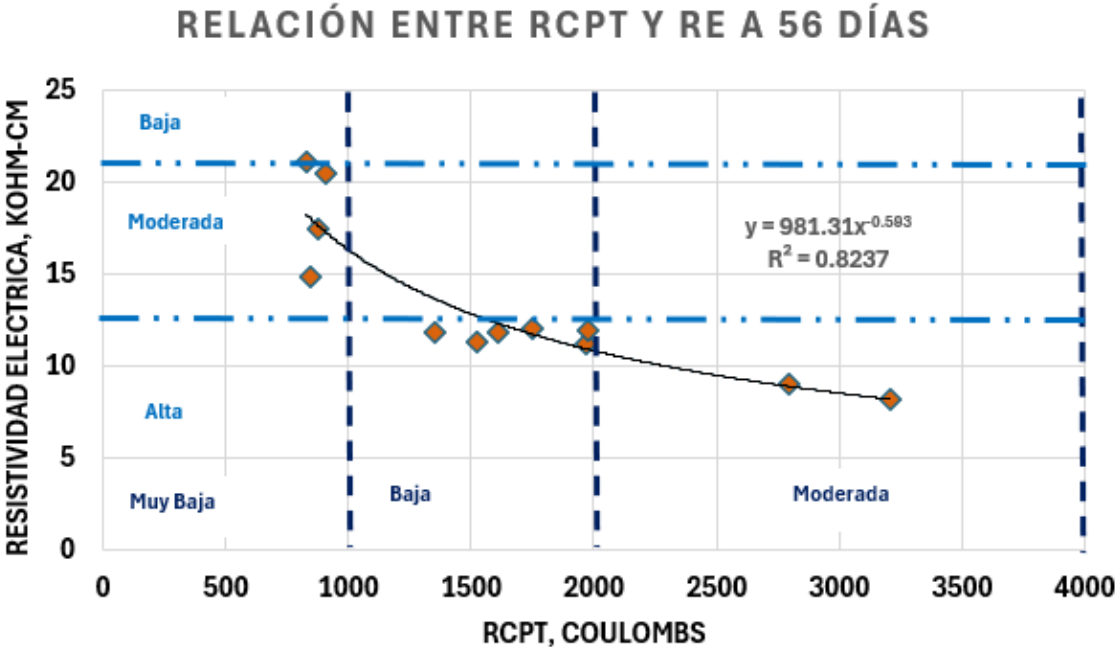
La propuesta 1, que es la mezcla con polímero súper absorbente en promedio consta de una lectura de 1 973 Coulombs, que, aunque se clasifica como una muestra baja conforme a la Tabla 13, se encuentra con un valor inferior a la penetración de iones cloruro que el testigo.

Además, a partir de la Tabla 21, podemos obtener una correlación entre RCPT y RE, la Figura 15 muestra la relación general entre las mediciones de todas las mezclas desarrolladas en este trabajo a los 56 días de elaboración. Cada punto de dato en la gráfica muestra el resultado de una prueba, una mezcla está compuesta por 2 pruebas.

La mayoría de las muestras se encuentran ubicadas en permeabilidad baja y una resistividad moderada.

Figura 15

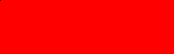




Correlación entre la prueba RCPT y RE a los 56 días



Elaboración propia con datos de: (AASHTO TP95, 2011)

A continuación, en la Tabla 23 se presenta una interpretación de la norma ASTM-1202, en donde con el resultado de la prueba podemos clasificar a que tipo de concreto pertenece.

Tabla 23*Interpretación de la determinación de permeabilidad rápida al ion cloruro*

Coulombs	Clasificación ASTM C1202	Tipo de concreto	Código color
>4 000	Alta	Relaciones a/c altas	
2 000 – 4 000	Moderada	Relación a/c 0.40 – 0.50	
1 000 – 2 000	Baja	Relación a/c < 0.40	
100 – 1 000	Muy baja	Concretos con Látex	
< 100	Despreciable	Concretos con polímeros	

Elaboración propia con datos de: (ASTM, ASTM C-1202 Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2017).

Cabe destacar que, las mezclas PL-052-23-PUE1 y PL-053-23-PUE1 son las que obtienen un menor resultado de lectura, por lo tanto, mayor capacidad de resistencia de penetración de iones cloruro, destacando que la mezcla 4 con micro sílica tiene un promedio de lectura de 865 Coulombs y la mezcla 5 con adición de ceniza volante de 864 Coulombs, por ende, estas mezclas las podemos clasificar como: muestras de concreto con penetración de iones cloruro, muy baja.

Los resultados de la determinación de la habilidad del concreto para resistir la penetración ion cloruro a los 90 días se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24*Resultados de la determinación de permeabilidad rápida al ion cloruro a 90 días*

Mezcla	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Coulombs (C)
PL-049-23-PUE1	100	50	1 285
PL-049-23-PUE1	100	50	1 210
PL-050-23-PUE1	100	50	1 312

PL-050-23-PUE1	100	50	1 441
PL-051-23-PUE1	100	50	2 084
PL-051-23-PUE1	100	50	1 989
PL-052-23-PUE1	100	50	600
PL-052-23-PUE1	100	50	565
PL-053-23-PUE1	100	50	807
PL-053-23-PUE1	100	50	905
PL-054-23-PUE1	100	50	937
PL-054-23-PUE1	100	50	952

Elaboración propia, bitácora de resultados, Fuentes Lozano 2023.

En la comparaativa de datos se observó que la mezcla con mayor habilidad para resistir la penetración de iones cloruros, sigue siendo la PL-052-23-PUE1 con inclusión de micro sílica, en donde con el paso del tiempo la habilidad ha mejorado hasta 582 Coulombs, caso contrario la mezcla con inclusión de ceniza volante, ya que con el ensaye a 90 días es un resultado promedio de 856 Coulombs, es decir, 8 Coulombs menos que el resultado a 56 días.

Por otro lado, el comportamiento de la mezcla testigo se comportó como las demás mezclas conforme el paso del tiempo, obteniendo en promedio una lectura de 1 247 Coulombs a los 90 días, es decir, que las mezclas en la prueba de permeabilidad al ion cloruro obtienen mayor densidad de matriz y mayor habilidad para resistir conforme pasa el tiempo.

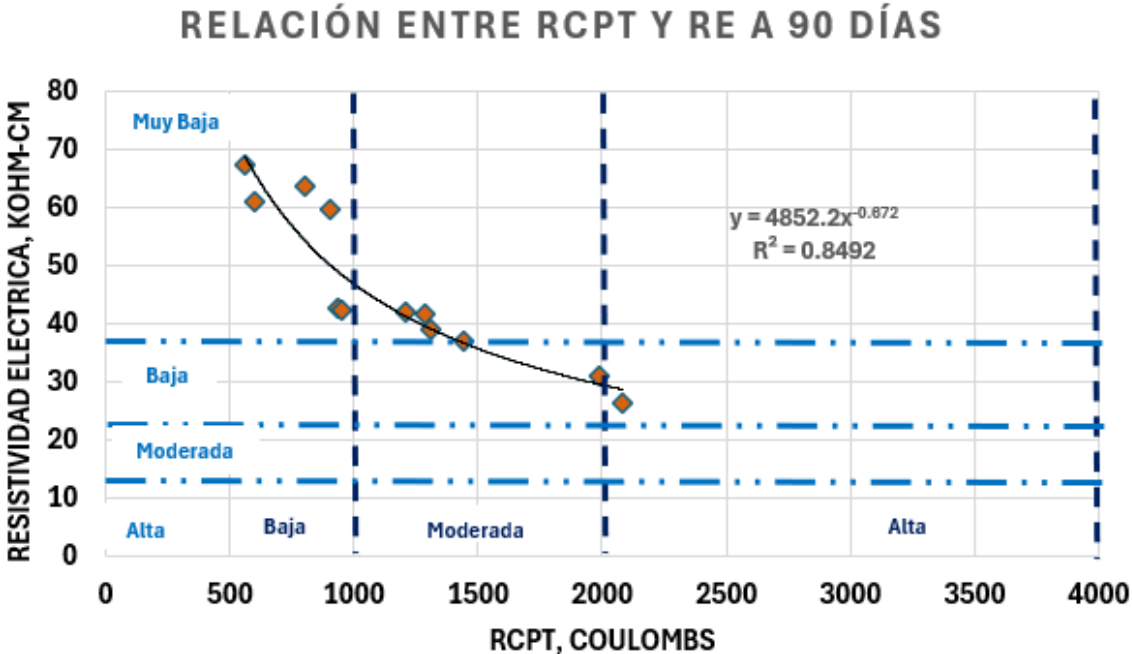
El comportamiento que se observó en la mezcla propuesta 1, con inclusión del polímero súper absorbente es muy parecido al testigo, pero se sigue quedando por debajo del testigo con 1 376 Coulombs a los 90 días, un incremento de lectura de 596 Coulombs.

La tendencia de las mezclas es la misma, a mayor tiempo, los resultados son más satisfactorios, permeabilidad resultado más bajo y resistividad eléctrica más alto. Como se menciona anteriormente, todos los datos de estos concretos son en laboratorio, pero con revenimiento y trabajabilidad óptima para un suministro industrial.

Conforme a la Tabla 21, la correlación entre RCPT y RE a 90 días se muestra en la Figura 16, donde los resultados son más estables entre las muestras, es decir, la mayoría presenta resultados de permeabilidad entre muy bajo y bajo.

Figura 16

Correlación entre la prueba RCPT y RE a los 90 días



Elaboración propia con datos de: (AASHTO TP95, 2011)

Conclusiones

En la presente propuesta se analizó con diferentes pruebas de laboratorio desde el concreto fresco hasta el endurecido, y sobre todo, con pruebas enfocadas en conocer la durabilidad del concreto. Además, se comparó con diferentes materiales suplementarios que han sido utilizados últimamente en la elaboración de concreto durables en México para mejorar la matriz del concreto.

El desempeño fue evaluado por medio de la prueba de resistividad eléctrica del concreto NMX-C-514-ONNCCE-2019 y Electrical Indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration ASTM C1202-17^a, a la edad de 56 y 90 días de elaboración de las mezclas.

Se ha destacado la utilización de un aditivo base poli carboxilato. Fue crucial su incorporación para este tipo de concretos ya que se obtiene la reducción de agua necesaria para tener una matriz de concreto densa.

Para su implementación, se utilizó la misma relación agua / cementante para todos los diseños con el fin de evaluar cada material y el cemento utilizado. Este fue el mismo en todas las mezclas: cemento portland compuesto resistente a los sulfatos. Las siguientes conclusiones son de las *propiedades en estado fresco*:

- De manera específica, los agregados ocupados en la región de Puebla aportan características físicas para nutrir al concreto de un buen comportamiento, un ejemplo claro son las masas unitarias, donde la tercera mezcla con inclusión de impermeabilizante a base de cristales reportó el mayor peso. Lo anterior, se puede constatar con la inclusión de aire.
- Las mezclas con inclusión de un cementante suplementario mejoraron la reología de los concretos, obteniendo mejor aspecto y menor segregación y sangrado.
- El uso del polímero súper absorbente demandó mayor cantidad de agua que el testigo para alcanzar el revenimiento del proyecto aunque con un mejor aspecto reológico, incluso, con la posibilidad de tener una relación grava / arena mayor.

- Es necesario calibrar la cantidad de aditivo antes de iniciar las mezclas del proyecto con el propósito de tener la cantidad de agua exacta en saturado superficialmente seco.
- Con resultados visuales, durante el momento de desmolde ninguna mezcla presentó retardo de fraguado. Lo ya mencionado fue verificado en los especímenes pues no tuvieron desperfectos en ningún molde.

De igual manera, se exponen de manera puntual las conclusiones finales de las *propiedades en estado endurecido*:

- En los resultados de resistencia a compresión, la mezcla con ceniza volante presentó la mayor resistencia a la edad de 28 días con 598 kg/cm^2 , por lo tanto, el efecto puzolánico de la ceniza se vio presente desde los primeros días del concreto.
- En los resultados de resistencia a compresión del concreto, el testigo tiene una ventaja de 12 kg/cm^2 con respecto a la propuesta con un polímero súper absorbente, esto es debido a que el propio producto requiere agua adicional al de la mezcla para poder funcionar, es decir, tener mayor cantidad de agua para después utilizarla como agente curador.

Además, de las *propiedades de durabilidad del concreto* se obtienen las siguientes conclusiones:

- La temperatura del ambiente del laboratorio fue la misma para todos los concretos en la prueba de resistividad eléctrica de $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ a los 56 y 90 días.
- La mezcla PL-052 tiene los mejores resultados en las pruebas de resistividad eléctrica y permeabilidad al ion cloruro a los 90 días, siendo mayores que la mezcla denominada testigo con una diferencia significativa.
- La mezcla elaborada con micro sílica se clasifica como baja en resistividad eléctrica y como muy baja en permeabilidad al ion cloruro, por lo tanto, es la mezcla de concreto recomendada para ambientes con presencia de cloruros.

- El uso de cementantes suplementarios es obligatorio si se realizan concretos con especificaciones de durabilidad.
- Conforme a los resultados obtenidos, la tabla de correlación entre tipos de concretos y resistividad eléctrica de la norma NMX-C-515 es correcta.
- La resistividad eléctrica y la permeabilidad al ion cloruro arrojan resultados similares y correlacionados, por lo que se consideran confiables para realizar un análisis de durabilidad partiendo de concretos con relaciones agua / cemento de 0.40.

De acuerdo con los resultados obtenidos en resistividad eléctrica y permeabilidad al ion cloruro a los 56 y 90 días, se puede juzgar aparentemente que la porosidad tiene mayor influencia en la durabilidad que los posibles micro agrietamientos derivados de la hidratación de la matriz del concreto.

Recomendaciones y trabajo futuro

De acuerdo con la experiencia en la aplicación de la propuesta de investigación, y con el deseo de retomar las mezclas aquí descritas, es importante considerar el uso del mismo aditivo poli carboxilato, así como seguir las condiciones de mezclado y elaboración de especímenes descritas en las normas mexicanas.

A continuación, algunas de las recomendaciones y/o sugerencias de implementación para futuros trabajos de investigación en el campo de durabilidad en concretos de alto desempeño son:

- Medir por peso todas las cantidades de los materiales.
- Los resultados a compresión han sido ensayados a la edad de 28 días como los concretos convencionales, una recomendación es realizar ensayos con un mínimo a los 90 días para poder comparar el efecto puzolánico de los materiales cementantes de las mezclas, y en casos óptimos, poder obtener resultados a los 180 días.

- Realizar las pruebas de tiempos de fraguado de cada una de las mezclas, aunque visualmente no se tiene ningún retraso, es conveniente revisar si el polímero súper absorbente presenta otro efecto en la mezcla.
- Realizar pruebas de contracción a los concretos de alto desempeño con cada uno de los sistemas propuestos, con el fin de verificar que porcentaje aporta cada material cementante y tomarlo como evaluación de durabilidad.
- Se sugiere que el uso del polímero súper absorbente se realice con su respectivo ajuste de mezcla, es decir, modificando la relación grava / arena por el aspecto que esta adición modifica en la reología del concreto.

Referencias

- AASHTO TP95. (2011). *Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of*. Washington, DC: AASHTO.
- Abrams, D. A. (2018). *Test of reinforced concrete beams*. Forgotten Books.
- American Concrete Institute. (2002). *Terminología del cemento y del concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.
- American Concrete Institute. (2010). *Report on Chemical Admixtures for concrete*. Farmington Hill: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2011). *Guide to curing concrete*. Detroit: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2017). *Report on service life prediction*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Andrade, C. (2004). *Calculation of initiation and propagation periods of service life of*. Madrid: Institute of Construction Science.
- ASTM. (2005). *Especificación Normalizada para Humo de sílice Utilizado en Mezclas Cementicias C1240*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- ASTM. (2008). *Especificación normalizada para cementos adicionados hidraulicos C595*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- ASTM. (2017). *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM. (2019). *Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón C618*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- Bentz, D., & Weiss, J. (2010). Internal Curing: A 2010 State of the Art Review. *National Institute of Standards and Technology*, 2-15.
- Cementos Fortaleza. (2023). *Análisis Físico químico del cemento*. Tula: Cementos Fortaleza.
- Cemex. (2011). *Construyendo un mejor futuro*. San Pedro Garza García: Cemex SAB de CV.
- Chan Yan, J., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Redalyc*, 39-46.
- Dhir , R., & Jones, R. (1994). *Impact of ENV 197 on Concrete Construction*. Dundee: E & FN SPON.

- Durán Herrera, A. (2020). Efecto sinérgico de un polímero súper-absorbente y un inhibidor de corrosión de nitrato de calcio en la durabilidad de un concreto de alto desempeño. *Revista ALCONPAT*, 206-218.
- Euclid Chemical. (s.f.). *Aditivo de microsilica en polvo, para concreto*. Tultitlán.
- Gjorv, O. (2014). *Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments*. Norway: CRC Press.
- Gudimettla, J., & Crawford, G. (2016). Resistivity Tests for Concrete. *ACI Materials Journal*, 505-514.
- Hernández Castañeda, O., & Mendoza Escobedo, C. J. (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 57-70.
- IMCYC. (2019). *Evaluación de Ceniza para uso*. CDMX: IMCYC.
- INSSO. (2018). *Ficha técnica polímero*. CDMX.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Illinois: Portland Cement Association.
- Kovler, K., & Jensen, O. (2005). Novel techniques for concrete curing. *Concrete international*, 39-42.
- Mendoza Rangel, J., & Castro Borges, P. (2009). Durabilidad. *Credibility of concepts and models about service life of concrete structures in the face of the effects of the global climatic change. A critical review*, 4, 2-3.
- Mindess, S., Young, F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Slovak: Prentice Hall.
- Mobasher, B. (2008). *USA-CONCRETE CONSTRUCTION INDUSTRY-CEMENT BASED MATERIALS AND CIVIL INFRASTRUCTURE*. Karachi: International Workshop.
- Neville, A. (1995). *Properties of Concrete*. New York: Addison Wesley Longman.
- Neville, A. (1998). Concreting technology / an essential element of structural design. *Concrete international*.
- Neville, A. (1998). Concreting technology / an essential element of structural design. *Concrete International*.
- Neville, A. (2003). *An examination of issues in concrete practice*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. Distrito Federal: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.

- ONNCCE. (2006). *Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión*. México, DF: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2010). *Determinación del revenimiento en el concreto fresco NMX-C-156-ONNCCE-2010*. México, DF: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *Concreto hidráulico dosificado en masa, especificaciones y métodos de ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2014). *Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*. México, DF: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ONNCCE. (2019). *Resistividad Eléctrica del concreto hidráulico*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- Philleo, R. (1991). *New Concrete Technology*. Washington: American Concrete Institute.
- Powers, T. C. (1948). *A Discussion of Cement Hydration*. Highway Research Board.
- Puertas, F. (2012). Escorias de Alto Horno, composición y comportamiento hidráulico. *Materiales de construcción*, 37.
- Schröfl, C., Mechtcherine, V., & Gorges, M. (2012). Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. *Elsevier*, 1-2.
- Sika. (2009). *Curado del concreto*. Medellín: Sika.
- Snoeck, D., Jensen, O. M., & De Beile, N. (2015). The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. *Elsevier*, 1-2.
- Torres Acosta, A. A., Moreno Valdés, A., Lomelí González, M. G., Martínez Madrid, M., & Díaz Cruz, A. (2018). Durabilidad de concretos autoconsolidables de baja relación agua cemento adicionados con microsílca. *Instituto*, 5.
- Torres Acosta, A., Moreno Valdés, A., Rodríguez Mendo, G., Lomelí Gonzalez, M., & Martínez Madrid, M. (2019). Efecto de la temperatura de prueba y la resistividad eléctrica húmeda en cilindros de concreto. *Instituto Mexicano del Transporte*, 1-27.

Uribe Afif, R. (2017). Evaluación físico química de una ceniza para verificar su cumplimiento como material cementante suplementario para uso en el concreto hidráulico. *Construcción y tecnología en concreto*, 40-42.

Villacero. (s.f.). *Ficha técnica*. Monterrey: Villacero.

Weber, S., & Reinhardt, H. W. (1997). A new generation of high performance concrete. *Advanced cement based materials*, 59-68.

Anexos

Tabla 12

Proporcionamiento de mezclas ajustado por humedad para 30 litros

Material / Mezcla	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Cemento (kg)	13.500	13.500	12.690	12.690	12.690	12.690
Agua (L)	3.210	3.211	3.271	3.271	3.271	3.271
Grava 20 mm (kg)	27.075	27.074	26.323	26.323	26.323	26.323
Arena (kg)	25.890	25.880	25.171	25.171	25.171	25.171
Aditivo línea (ml)	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5
Aditivo	148.5	148.5	148.5	148.5	148.5	148.5
Policarboxilato (ml)						
Polímero súper absorbente (g)	-	8	-	-	-	-
Impermeabilizante a base de cristales (g)	-	-	0.810	-	-	-
Micro sílica (g)	-	-	-	0.810	-	-
Ceniza volante (g)	-	-	-	-	0.810	-
Escoria de alto horno (g)	-	-	-	-	-	0.810

Elaboración propia con datos de pruebas de laboratorio.