



Caracterización física y mecánica por desempeño de morteros de reparación, para su uso en la infraestructura del transporte de la SCT

María del Rocío Mejía Durán
Andrés Antonio Torres Acosta
Angélica de Lourdes del Valle Moreno
Victoria Eugenia Vázquez Galván
Carlos Trueba Mendoza
Miguel Martínez Madrid
María Guadalupe Lomelí González

**Publicación Técnica No. 513
Sanfandila, Qro, 2018**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Caracterización física y mecánica por desempeño
de morteros de reparación, para su uso en la
infraestructura del transporte de la SCT**

Publicación Técnica No. 513
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte en conjunto con la empresa Sika Mexicana S.A de C.V., por la M.C. María del Rocío Mejía Durán, el Dr. Andrés A Torres Acosta, la Dra. Angélica del Valle Moreno, la Ing. Victoria Eugenia Vázquez Galván, el Ing. Carlos Trueba Mendoza y la Ing. María Guadalupe Lomelí González. Se agradecen las observaciones y recomendaciones técnicas del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

Por último, se agradece a la compañía SIKA Mexicana S.A. de C.V. por haber proporcionado el apoyo económico para la realización de esta investigación, mediante el suministro del material y asesoría técnica relacionada con las propiedades del mismo durante todo el proceso de experimentación.

Los resultados mostrados corresponden a una parte del Proyecto Externo: EE 23/13 Sistema de gestión, evaluación en detalle por durabilidad y capacidad de carga de la infraestructura de los puertos federales mexicanos; que corresponde a la caracterización de materiales de rehabilitación/repación o refuerzo que podrían usarse en los puertos federales mexicanos.

Contenido

Índice de figuras		v
Índice de tablas		vii
Sinopsis		ix
Abstract		xi
Resumen	Ejecutivo	xiii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	3
	1.1 SG AD	3
	1.2 SG 202	3
	1.3 SMT 723	4
	1.4 SMT 412	4
	1.5 ST 121	4
	1.6 ST 122	4
	1.7 SGrout	5
Capítulo 2.	Metodología	7
	2.1 Pruebas físicas, químicas y mecánicas a edades de 1 a 120 días	10
	2.1.1 Resistencia a la compresión	10
	2.1.2 Cambios longitudinales	11
	2.1.3 Resistividad eléctrica	11
	2.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico	13
	2.1.5 Resistencia a sulfatos	14

	2.1.6	Permeabilidad al Ion cloruro	15
	2.1.7	Permeabilidad al agua	15
	2.1.8	Porosidad total	16
	2.1.9	Absorción capilar	17
Capítulo 3.		Resultados y Discusión	21
	3.1	Resistencia a la compresión	21
	3.2	Cambios longitudinales	22
	3.3	Resistividad eléctrica	22
	3.3.1	Resistividad eléctrica en cubos	22
	3.3.2	Resistividad eléctrica en cilindros	22
	3.4	Velocidad de pulso ultrasónico de cubos y cilindros	24
	3.5	Resistencia a sulfatos	26
	3.6	Permeabilidad al ion cloruro	27
	3.7	Porosidad efectiva, absorción total y % total de vacíos.	29
	3.8	Permeabilidad al agua	33
	3.9	Evaluación integral por durabilidad	33
Capítulo 4.		Conclusiones	37
Bibliografía			39

Índice de tablas

Tabla 2.1	Criterios para evaluar resistividad eléctrica (Manual DURAR)	12
Tabla 2.2	Criterios para evaluar velocidad de pulso ultrasónico (VPU). NMX-C-275-ONNCCE-2004	14
Tabla 2.3	Criterios para evaluar permeabilidad de ion cloruro (ASTM C1202)	15
Tabla 2.4	Criterios para evaluar porosidad total	17
Tabla 3.1	Desempeño de los morteros evaluados a 28 días	34
Tabla 3.2	Desempeño de los morteros evaluados a 120 días	35

Índice de figuras

Figura 2.1	Cilindros de mortero 10 x 20 cm, cubos de 15 x 15 cm, cubos de 5 X 5 cm y barras de mortero usadas en la experimentación	8
Figura 2.2	Prueba de fluidez de morteros	9
Figura 2.3	a) Contenido de aire, b) Masa unitaria y tiempo de fraguado	9
Figura 2.4	Cuarto de curado de especímenes usados	10
Figura 2.5	Ensaye de resistencia a la compresión	10
Figura 2.6	Medición de cambios volumétricos	11
Figura 2.7	Resistómetro Nilsson para prueba de resistividad en cubos	12
Figura 2.8	Resistómetro Resipod para prueba de resistividad eléctrica en cilindros	13
Figura 2.9	Prueba de velocidad de pulso ultrasónico	13
Figura 2.10	Ensaye de resistencia a sulfatos.	14
Figura 2.11	Ensaye de permeabilidad al ion cloruro	15
Figura 2.12	a) Permeámetro, b) Verificación de profundidad de penetración de agua	16
Figura 2.13	Medición de peso saturado sumergido	16
Figura 2.14	Ensaye de absorción capilar	18
Figura 3.1	Resistencia a la compresión de cubos de 5 x 5 cm	21
Figura 3.2	Cambios longitudinales de barras de 2.5 cm X 2.5 cm X 25 cm	22
Figura 3.3	Resistividad eléctrica de cubos de 5 x 5 cm	23
Figura 3.4	Resistividad eléctrica de cilindros de 10 cm x 20 cm	24
Figura 3.5	Velocidad de pulso ultrasónico en cubos de 5 x 5 cm	25

Figura 3.6	Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de 10 cm x 20 cm	26
Figura 3.7	Resistencia a sulfatos de barras de 2.5 cm X 2.5 cm X 25 cm	27
Figura 3.8	Permeabilidad rápida al ion cloruro: (a) 28 días (b) 120 días	28
Figura 3.9	Porosidad efectiva: (a) 28 días y (b) 120 días	30
Figura 3.10	Absorción total de agua: (a) 28 días y (b) 120 días	31
Figura 3.11	Porcentaje total de vacíos a a) 28 días y b) 120 días	32
Figura 3.12	Permeabilidad a 28 días	33

Sinopsis

En el presente estudio se describe la evaluación de morteros con base en criterios de durabilidad para ser usados como materiales de rehabilitación o reparación en estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes marinos.

Se realizaron pruebas a los productos de las mezclas, las cuales fueron: Prueba de fluidez en mesa y cono, prueba de contenido de aire, masa unitaria y fraguado.

El objetivo de este estudio fue el analizar los siete tipos de morteros con que se contó, diferenciar sus propiedades de durabilidad y contrastar los resultados obtenidos para poder llegar a conclusiones que permitan validar su uso en ambientes específicos.

El capítulo 1 muestra los antecedentes del estudio y detalla las características y propiedades de cada una de los 7 morteros estudiados.

El capítulo 2 describe cada uno-de los ensayos físicos, químicos y mecánicos que se realizaron a los 7 morteros.

El capítulo 3 muestra los resultados y la discusión de cada uno de los ensayos ejecutados y se muestran dos tablas donde se clasifican los 7 productos en orden de su desempeño.

El capítulo 4 detalla las conclusiones a que se llegó.

Abstract

The present study describes the evaluation of mortars based on durability criteria to be used as rehabilitation or repair materials in reinforced concrete structures exposed to marine environments.

Tests were carried out on the products of the mixtures, which were: Test of fluidity in table and cone, test of air content, unit mass and setting.

The objective of this study was to analyze the seven types of mortars that were counted, differentiate their durability properties and contrast the results obtained in order to reach conclusions that allow validation of their use in specific environments.

Chapter 1 shows the background of the study and details the characteristics and properties of each of the seven mortars studied.

Chapter 2 describes each of the physical, chemical and mechanical tests performed on the seven mortars.

Chapter 3 shows the results and the discussion of each of the executed trials and shows two tables where the seven products are classified in order of their performance.

Chapter 4 details the conclusions reached.

Resumen ejecutivo

Esta investigación es una de las líneas de investigación del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) es desarrollar morteros y concretos de altas prestaciones-para, en un futuro, emplearlos en reparación de infraestructura de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), tales como puentes y muelles. Este tipo de estructuras deben ser constantemente evaluadas para prevenir cualquier tipo de accidente que ponga en riesgo vidas humanas. Se ha determinado que diversos factores como el diseño, el material, el proceso de fabricación y operación son de gran importancia para determinar la integridad de los elementos estructurales. Por esta razón, en el Instituto se desea explorar morteros de diferentes marcas, para el uso en rehabilitación o reparación de estructuras de concreto reforzado expuesto a ambientes marinos.

En esta investigación se evaluaron siete morteros de una marca comercial:

- 1) SG AD
- 2) SG 202
- 3) SMT 723
- 4) SMT 412
- 5) ST 121
- 6) ST 122
- 7) SGrout

Las pruebas realizadas a los morteros fueron físicas, químicas y mecánicas a diferentes edades. Se realizaron los siguientes análisis: Resistividad eléctrica, Velocidad de pulso ultrasónico, Resistencia a la compresión, Cambios volumétricos, Resistencia a la penetración de ion cloruro, Profundidad de penetración de agua, Porcentaje total de vacíos, Absorción capilar y Resistencia a sulfatos. Todas estas pruebas se hicieron a 3, 7, 28 y 120 días.

Los morteros tipo ST no son aptos para utilizarse como material de reparación o rehabilitación en ambientes marinos ya que muestran mayor absorción de ion cloruro y absorción de sulfatos; sin embargo, puede utilizarse para otra aplicación ya que sus demás características están dentro del rango medio de durabilidad.

El mortero SG 202 presenta mejores características en relación a los demás materiales, en toda la caracterización presenta resultados dentro de los criterios aceptables, se dejará la aplicación de acuerdo a los requerimientos del proyecto en cuestión.

Introducción

El presente trabajo se refiere a los morteros de reparación que se podrían utilizar en la reparación de estructuras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Los morteros se pueden definir como la mezcla constituida por arena, algún conglomerante y agua.

Como conglomerante se emplea el cemento, el yeso y la cal, los cuales pueden utilizarse solos o combinados. Así, en el caso de que la mezcla lleve dos o más conglomerantes, se le denomina mortero mixto.

La característica principal de los morteros es que generalmente están listos para usarse, tienen altas resistencias, con capacidad de prepararse con alta fluidez, compuestos de una combinación de cementantes, agregados de granulometría controlada, aditivos fluidificantes y reductores de agua de alto rango, adecuadamente dosificados para controlar los cambios de volumen.

Debido a la gran variedad de morteros que existen en el mercado, se decidió analizar siete (7) morteros de una marca comercial, para confirmar que dichos productos son aplicables en reparaciones hechas por la SCT.

La metodología empleada fue experimental correlacional. Para la fabricación de las probetas de los morteros se realizaron pruebas de fluidez en mesa y cono, contenido de aire, masa unitaria y fraguado.

Para el análisis de la durabilidad se realizaron los siguientes ensayos: Resistividad eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Resistencia a la compresión, Cambios Volumétricos, resistencia a la penetración de Ion cloruro, Profundidad de penetración de agua, Porcentaje total de vacíos, Absorción Capilar y Resistencia a los Sulfatos. Para la realización de los ensayos mencionados, se fabricaron 15 cilindros de (10 x 20) cm, 2 cubos de (15 x 15) cm y 27 cubos de (5 x 5) cm. Todos estos análisis se basaron en normas nacionales e internacionales. Los ensayos se hicieron a 3, 7, 28 y 120 días de edad.

El objetivo de este estudio es el analizar los siete tipos de morteros con que se cuenta, diferenciar sus propiedades de durabilidad y contrastar los resultados obtenidos para poder llegar a conclusiones que permitan validar su uso en ambientes específicos.

1 Antecedentes

En los últimos años se ha buscado satisfacer la necesidad de construir o rehabilitar estructuras de concreto reforzado con criterios de durabilidad que permitan a la estructura una larga duración de vida útil.

Para ello, se han utilizado morteros para la reparación y restauración de edificios arquitectónicos como ejemplo.

Las estructuras construidas cerca de ambientes marinos son más propensas a sufrir deterioros por la concentración de cloruros del agua de mar y por los ciclos de secado y húmedo de las mareas, los materiales a utilizar tienen que presentar características de durabilidad que sean impermeables a las soluciones que están en contacto con ellos.

En este proyecto, se seguirá la línea de investigación del Instituto Mexicano del Transporte de estudiar morteros y concretos de altas prestaciones para, en un futuro, emplearlos en reparación de infraestructura de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, tales como puentes y muelles. Por esta razón, en el Instituto se desea explorar morteros comerciales, para el uso de rehabilitación o reparación en estructuras de concreto reforzado expuestos a ambientes marinos.

1.1 SG AD

Mortero listo para usar de alto desempeño, compuesto de cemento, agregados de granulometría controlada y aditivos adecuadamente dosificados para controlar los cambios de volumen en el mortero.

Se usa como relleno de expansión controlada y de alta adherencia en áreas confinadas. Reparación estructural de concreto. Aplicaciones que requieren altas resistencias iniciales. Mezcla de agregados ideal para aplicaciones de inyección por bombeo.

1.2 SG 202

Mortero listo para usar, compuesto de cemento, arena de granulometría controlada y aditivos adecuadamente dosificados para controlar los cambios de volumen en el mortero. Mortero expansivo de consistencia media a alta fluidez. Uso general en construcción y reparación estructural de concreto.

1.3 SMT 723

Mortero monocomponente de reparación estructural, base cemento modificado con polímeros, de alto desempeño, listo para su uso en aplicaciones de bajo espesor como nivelaciones y acabados.

Su uso es adecuado para trabajos de rehabilitación estructural, para preservar o restaurar la pasividad en el acero de refuerzo dentro del concreto armado, reparar defectos (concreto poroso o con hormigueros), como recubrimiento de protección para reducir el fenómeno de carbonatación y el ingreso de cloruros en elementos de concreto armado.

1.4 SMT 412

Mortero de reparación estructural de un componente, reforzado con fibras, de baja retracción.

Se usa en trabajos de reparación de concreto, reparación de desconchones y daños del concreto en edificios, puentes, infraestructuras y superestructuras, es adecuado para trabajos de refuerzo estructural del concreto, para incrementar la capacidad portante de las estructuras de concreto mediante la adición de mortero, es adecuado para el incremento del recubrimiento con mortero adicional y sustitución del concreto contaminado o carbonatado.

1.5 ST 121

Mortero de 2 componentes, base cemento modificado con polímeros, de granulometría fina, consistencia de espátula y de alta adherencia para la protección y reparación de superficies de concreto, mortero o mampostería.

Se usa como revestimiento de bajo espesor, alta impermeabilidad y resistencia sobre concreto, mortero o mampostería, en piscinas, cisternas, estanques, canales, etc., como recubrimiento de gran adherencia y resistencia para la protección de estructuras de concreto.

1.6 ST 122

Mortero de dos componentes, a base de cemento, mejorado con resinas sintéticas, humo de sílice y fibras de poliamida; de altas resistencias mecánicas, especialmente indicado para la reparación y regularización de elementos de concreto.

Se utiliza como mortero de reparación sobre soportes de concreto en reparación de estructuras de concreto armado. Relleno de coque y nidos de grava en muros, vigas o pilares de concreto y como protección de armaduras, en la reparación de desconchones y daños del concreto en edificios, puentes, infraestructuras y

superestructuras. Su uso es adecuado para trabajos de refuerzo estructural del concreto, incremento de la capacidad portante de las estructuras de concreto mediante la adición de mortero.

1.7 SGrout

Mortero listo para usar, de altas resistencias, con capacidad de prepararse con alta fluidez, compuesto de una combinación de cementantes, agregados de granulometría controlada, aditivos fluidificantes y reductores de agua de alto rango adecuadamente dosificados para controlar los cambios de volumen.

Se usa como relleno de expansión controlada en áreas confinadas y en aplicaciones que requieran rápido desarrollo de resistencias. Trabajos de reparación estructural del concreto.

2 Metodología

Se evaluaron los siguientes morteros: SG AD, SG 202, SMT 723, SMT 412, ST 121, ST 122 y SGrout. Cada mortero fue preparado según las instrucciones del fabricante:

1. SG AD: Verter el 90% de la cantidad de agua requerida (3.6 l / saco de 30 kg) para el mezclado, vaciando enseguida todo el mortero SG AD gradualmente. Mezclar 3 minutos como mínimo y utilizar el agua restante para obtener una mezcla homogénea y libre de grumos. Usar mezclador para morteros de bajas revoluciones para evitar inclusión de aire y lograr una mejor homogenización del producto.

2. SG 202: Verter primeramente 2/3 partes del agua de mezclado (2.4 l) agregando enseguida todo el mortero gradualmente (30 kg); efectuar un mezclado de 3 minutos como mínimo hasta obtener una consistencia homogénea y libre de grumos, posteriormente agregar gradualmente el restante 1/3 del agua (1.2 l) requerida.

3. SMT 723: Verter 4.25 litros de agua dentro del recipiente de mezclado. Vaciar gradualmente 25 kg de polvo al agua mientras agita la mezcla. Mezclar a conciencia durante al menos 3 minutos, o hasta homogeneizar la mezcla con un taladro manual de bajas revoluciones.

4. SMT 412: Verter de 3,6 a 3,9 litros de agua por 25 kg de polvo. Añadir el polvo al agua, mientras se va batiendo la mezcla. Mezclar concienzudamente durante, al menos 3 minutos, hasta conseguir la consistencia requerida con una batidora manual de bajas revoluciones (< 500 rpm).

5. ST 121: Proporción de la mezcla A: B = 1: 4.26 (en peso). Poner primero el 90% del componente A (líquido) y en forma gradual todo el componente B (polvo), mezclar manualmente o con taladro de bajas revoluciones (máximo 250 RPM) hasta obtener un material homogéneo y libre de grumos. Seguir mezclando y agregar el líquido restante de componente A.

6. ST 122: Verter sobre el componente A (líquido) la totalidad del componente B (polvo), batiendo durante 2 o 3 minutos hasta conseguir una masa homogénea.

7. SGrout: Verter el 90% de la cantidad de agua requerida (3 l / saco) para el mezclado, vaciando enseguida todo el mortero SGrout gradualmente. Mezclar 3 minutos como mínimo y utilizar el agua restante para ajustar la consistencia hasta obtener una mezcla homogénea y libre de grumos. Usar mezclador para morteros de bajas revoluciones para evitar inclusión de aire y lograr una mejor homogenización del producto.

Para cada uno de los 7 morteros estudiados, se fabricaron 15 cilindros de 10 cm x 20 cm, 2 cubos de 15 cm, 27 cubos de 5 cm y 8 barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 25 cm para las pruebas necesarias. (Figura 2.1).



Figura 2.1 Cilindros de mortero 10 x 20 cm, cubos de 15 x 15 cm, cubos de 5 X 5 cm y barras de mortero usadas en la experimentación.

Para la fabricación de las probetas, se realizaron pruebas de fluidez en mesa al SG AD, SG 202 y SGrout y en cono al SMT 723, SMT 412, ST 121 y ST 122 (ver Figura 2.2).



Figura 2.2 Prueba de fluidez de morteros

También se realizaron las pruebas de contenido de aire, masa unitaria y fraguado al mortero fresco, como se observa en la figura 2.3.



(a)



(b)

Figura 2.3 a) Contenido de aire, b) Masa unitaria y tiempo de fraguado

A las 24 horas de preparadas, se desmoldaron las probetas y se colocaron en el cuarto de curado a una temperatura de 25 °C hasta la fecha de ensaye programado. (Figura 2.4).



Figura 2.4 Cuarto de curado de especímenes usado.

2.1 Pruebas físicas, químicas y mecánicas a edades de 1 a 120 días

Las pruebas físicas, químicas y mecánicas realizadas en cubos, cilindros y barras de mortero, en los tiempos especificados, se muestran a continuación.

2.1.1 Resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión se efectuó con el equipo especializado para cubos de mortero, este ensayo se realizó después de hacer las pruebas no destructivas de VPU y resistividad eléctrica a las fechas programadas de 2, 3, 7, 28 y 120 días, como se muestra en la Figura 2.5. Se realizó de acuerdo con la Norma NMX-C-083-ONNCCE-2016. El criterio de durabilidad que se considera para cubos de mortero es el de concreto, el cual menciona que una resistencia mayor a los 45 MPa es un material durable.



Figura 2.5 Ensayo de resistencia a la compresión

2.1.2 Cambios longitudinales

Los cambios longitudinales por secado que sufren los morteros y concretos se monitorean de acuerdo a la Norma ASTM C 157/C 157M – 08, en la Figura 2.6 se observan las barras y el equipo para las mediciones de cambios.



Figura 2.6 Medición de cambios volumétricos

2.1.3 Resistividad eléctrica

Se realizó la prueba de resistividad eléctrica por medio del método directo utilizando el equipo Nilsson para medir la resistencia eléctrica, como se observa en la Figura 2.7, siguiendo la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016, esto se hizo en cubos y cilindros a las edades de 1, 3, 7, 28, 56, 90 y 120 días, para obtener el valor de resistividad eléctrica se utilizó la fórmula 1:

$$\rho = R \left(\frac{A}{L} \right) \quad k\Omega - cm \quad 1$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica en $k\Omega - cm$

R = Resistencia eléctrica en $k\Omega$

A = Área en cm^2

L = Longitud en cm



Figura 2.7 Resistómetro Nilsson para prueba de resistividad en cubos

La Tabla 2.1 muestra los criterios internacionales considerados para evaluar la resistividad.

Tabla 2.1 Criterios para evaluar resistividad eléctrica (NMX-C-514)

Resistividad	Probabilidad de corrosión
> 100 kΩ·cm – 200 kΩ·cm	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. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 kΩ·cm a 100 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 kΩ·cm a 50 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
< 10 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE-2015 (véase 2. Referencias) refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

En paralelo se realizó la misma prueba de resistividad eléctrica en cilindros con el equipo Resipod de Proceq (método de 4 puntas, ver Figura 2.8) donde se obtiene directamente el valor de resistividad en medio continuo. Dicho valor se multiplica por un factor de forma, k, de acuerdo a la Norma ONNCCE NMX-C-514, el cual considerando la distancia entre las puntas de medición (38 mm), el diámetro del

cilindro (100 mm) y la longitud del mismo (200 mm) es igual a $k=2.2$. El valor obtenido con el equipo se divide entonces por este factor de forma k .



Figura 2.8 Resistómetro Resipod para prueba de resistividad eléctrica en cilindros

2.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico

La prueba de Velocidad de pulso ultrasónico se realizó de acuerdo a la Norma NMX-C-275-ONNCCE-2004, por el método de transmisión directa, los transductores en las caras opuestas del material se colocaron en ambas caras del cubo y del cilindro, un poco de gel y se presionaron, ya colocados se encendió el equipo y se registró cada medición en μs y se calculó la velocidad con la Fórmula 2. Ver Figura 2.9.



Figura 2.9 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico

La Tabla 2.2 muestra los criterios para evaluar los resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico.

$$V = \frac{d}{t} \quad \frac{m}{s} \quad 2$$

Donde:

V = velocidad de pulso ultrasónico en m

d = distancia en m

t = tiempo en s

Tabla 2.2 Criterios para evaluar velocidad de pulso ultrasónico (VPU). NMX-C-275-ONNCCE-2004

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del concreto
< 2000	Deficiente
2001 a 3000	Normal
3001 a 4000	Alta
> 4000	Durable

2.1.5 Resistencia a sulfatos

La Norma ASTM C 1012 – 95 establece el procedimiento para la prueba de resistencia a sulfatos, la cual se basa en el cambio dimensional de barras de mortero expuestas a una solución de sulfato, en la Figura 2.10 se muestran las barras dentro de solución de sulfatos.



Figura 2.10 Ensayo de resistencia a sulfatos.

2.1.6 Permeabilidad al Ion cloruro

Se realizó conforme a la norma ASTM-C-1202 (Figura 2.11), éste proporciona una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones cloruro donde se obtiene la carga en Coulombs y de acuerdo a los criterios de durabilidad que se muestran en la Tabla 2.3, muestra los rangos en que se encuentra la permeabilidad: alta, moderada, baja, muy baja o despreciable.



Figura 2.11 Ensayo de permeabilidad al ion cloruro

Tabla 2.3 Criterios para evaluar permeabilidad de ion cloruro (ASTM C-1202)

Carga transmitida (Coulombs)	Penetrabilidad de ion cloruro
> 4,000	Alta
2,000 a 4,000	Moderada
1,000 a 2,000	Baja
100 a 1,000	Muy baja
< 100	Despreciable

2.1.7 Permeabilidad al agua

La prueba de permeabilidad al agua se llevó a cabo bajo presión, se colocaron los cubos de 15 x 15 cm sobre agua y se dejaron 2 días para absorción, después los cubos se ensayaron para partirlos a la mitad y poder corroborar la profundidad a la que llegó el agua y se midió con un flexómetro la profundidad de penetración del agua, el criterio considerado es 3 cm, si el valor es mayor se considera un material

poco durable, el procedimiento de ensayo se realizó conforme a la Norma UNE-EN 12390/NTC 4483. Ver Figura 2.12.



Figura 2.12 a) Permeámetro, b) Verificación de profundidad de penetración de agua

2.1.8 Porosidad total

Esta prueba se basó en el Manual DURAR, los cubos y los cilindros cortados de 5 cm se secaron a peso constante a 50°C para evitar cambios en la microestructura y se registraron los datos, posteriormente se saturaron superficialmente con atomizador con agua natural y el peso se registró hasta lograr peso constante saturado, para obtener el peso saturado sumergido los cubos se sumergieron totalmente en agua y con ayuda de la balanza hidrostática se pesó, como se muestra en la Figura 2.13, con estos datos se calculó el porcentaje total de vacíos con la Fórmula 3. La Tabla 2.4 muestra los criterios para evaluar porcentaje total de vacíos.



Figura 2.13 Medición de peso saturado sumergido

$$\% \text{ porosidad total} = \frac{(W_{\text{saturado}} - W_{50^{\circ}\text{C}})}{(W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}})} * 100 \quad 3$$

Donde:

W_{saturado} = peso saturado en g

$W_{\text{sumergido}}$ = peso sumergido en g

$W_{50^{\circ}\text{C}}$ = peso seco constante en g

Tabla 2.4 Criterios para evaluar porosidad total

Porosidad Total	Características del concreto
≤10%	Buena calidad y compacidad
10%-15%	Moderada calidad
>15%	Inadecuada durabilidad

2.1.9 Absorción capilar

Este ensaye se hizo siguiendo la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015. Las probetas de mortero de las diferentes mezclas, se colocaron en horno a secado a 50 °C y se dejaron ahí hasta peso constante, después se cubrieron las áreas laterales de los cubos con parafina y se registró el peso inicial.

El cubo se colocó sobre barras dentro de un recipiente con agua. El recipiente se llenó a una altura de 3 mm por encima de la cara inferior de los cubos, durante en ensaye se mantuvo cerrado el contenedor para evitar la evaporación y se registró el cambio de peso en los tiempos de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48 ... horas, hasta que fue constante, momento en el cual se concluyó la prueba. Figura 2.14.



Figura 2.14 Ensaye de absorción capilar

Los coeficientes se calcularon con base en las Fórmulas 4 a 7.

$$m = \frac{t}{z^2} \quad \frac{s}{m^2} \quad 4$$

Donde:

m = resistencia a la penetración de agua en s/m^2

z = profundidad de penetración del agua en m

t = tiempo en s

$$k = \frac{\frac{(W_t - W_0)}{A}}{\sqrt{t}} \quad \frac{kg}{m^2 s^{1/2}} \quad 5$$

Donde:

k = coeficiente de absorción capilar en $\frac{kg}{m^2 s^{1/2}}$ A = área en m^2

W_0 = peso inicial en kg

t = tiempo en s

W_t = peso en el tiempo t en kg

$$\varepsilon e = \frac{k\sqrt{m}}{\rho} \times 100 \quad \% \quad 6$$

Donde:

$\varepsilon e =$ porosidad efectiva en $\frac{m^3}{m^3}$

$k =$ coeficiente de absorción capilar en $\frac{kg}{m^2 s^{1/2}}$

$m =$ resistencia a la penetración del agua en $\frac{s}{m^2}$

$\rho =$ densidad del agua en $\frac{kg}{m^3}$

El coeficiente k puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(W_t - W_0)/A$ en función de \sqrt{t} .

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando $z = H$

Con la anterior información la Absorción Capilar, S , se calculó con la fórmula 7.

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad \frac{m}{s^{1/2}} \quad 7$$

Donde:

$S =$ absorción capilar en $\frac{m}{s^{1/2}}$

$m =$ resistencia a la penetración del agua en $\frac{s}{m^2}$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos a los 120 días, muestran un resultado favorable en cuanto a la resistencia a la compresión obtenida, de acuerdo con los criterios de durabilidad, un concreto de alta resistencia debe sobrepasar los 450 kg/cm² para estar dentro de los criterios aceptables, todos los morteros estudiados superan los límites de las resistencias durables y las mencionadas en sus fichas técnicas. El mortero con más elevada resistencia a la compresión fue SG AD a la edad de 120 días, junto con el SG 202 y el SMT 412 que se encuentran dentro del mismo rango de 600 kg/cm², en el siguiente rango de 500 kg/cm² se encuentran el ST 121 y el ST 122, lo cual se puede observar en la Figura 3.1. La línea roja marca el límite de un concreto durable a 450 kg/cm².

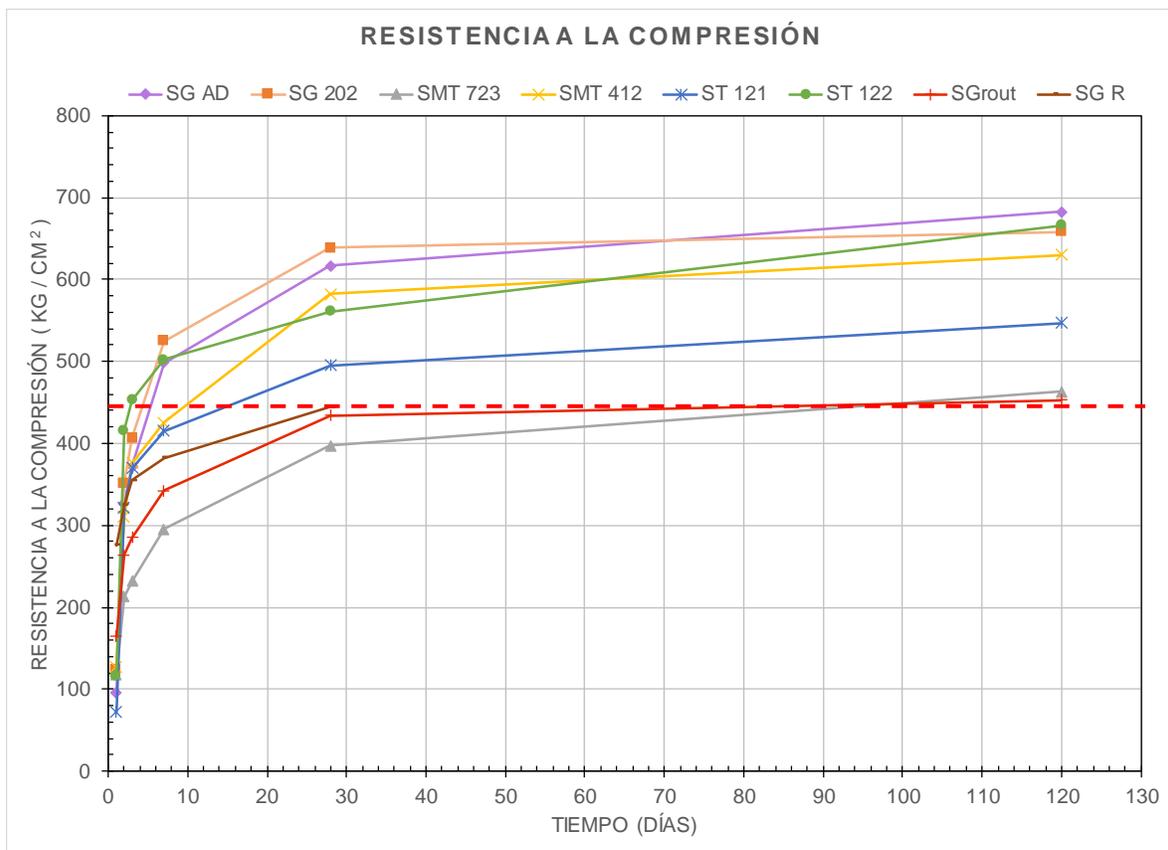


Figura 3.1 Resistencia a la compresión de cubos de 5 x 5 cm

3.2 Cambios longitudinales

En los cambios longitudinales según la Norma ASTM C 157/C 157M – 08 el promedio no debe exceder una desviación estándar de 0.0084 %, todos los morteros cumplieron y las barras del mortero SMT 412 presentaron la menor desviación estándar a los 112 días en relación a los demás productos (Figura 3.2).

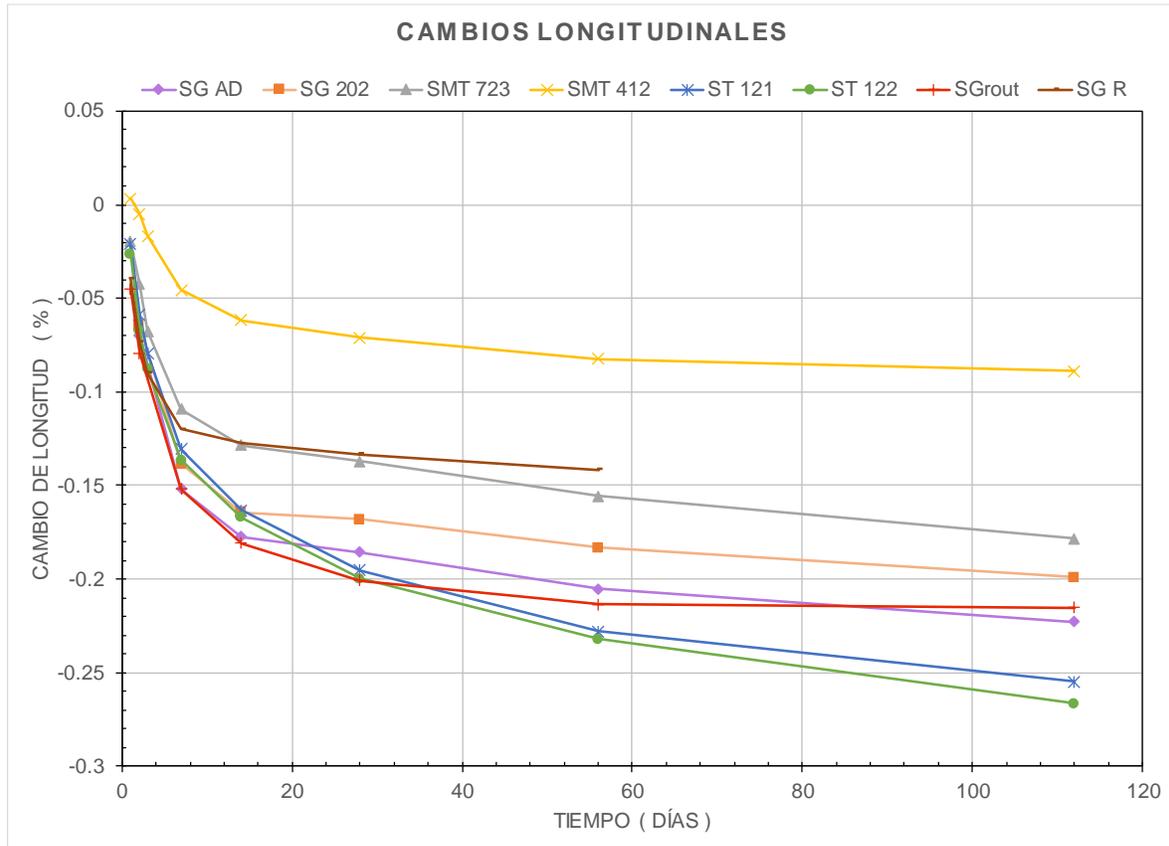


Figura 3.2 Cambios longitudinales de barras de 2.5 cm X 2.5 cm X 25 cm

3.3 Resistividad eléctrica

3.3.1 Resistividad eléctrica en cubos

Hasta los 120 días el mortero SG 202 fue el que presentó mayor resistividad eléctrica, así también se encuentra en el rango de riesgo moderado de acuerdo con los criterios de durabilidad de la Norma NMX-C-514 de ONNCCE (ver Figura 3.3). La línea roja marca el límite del criterio de aceptación entre riesgo moderado y alto riesgo.

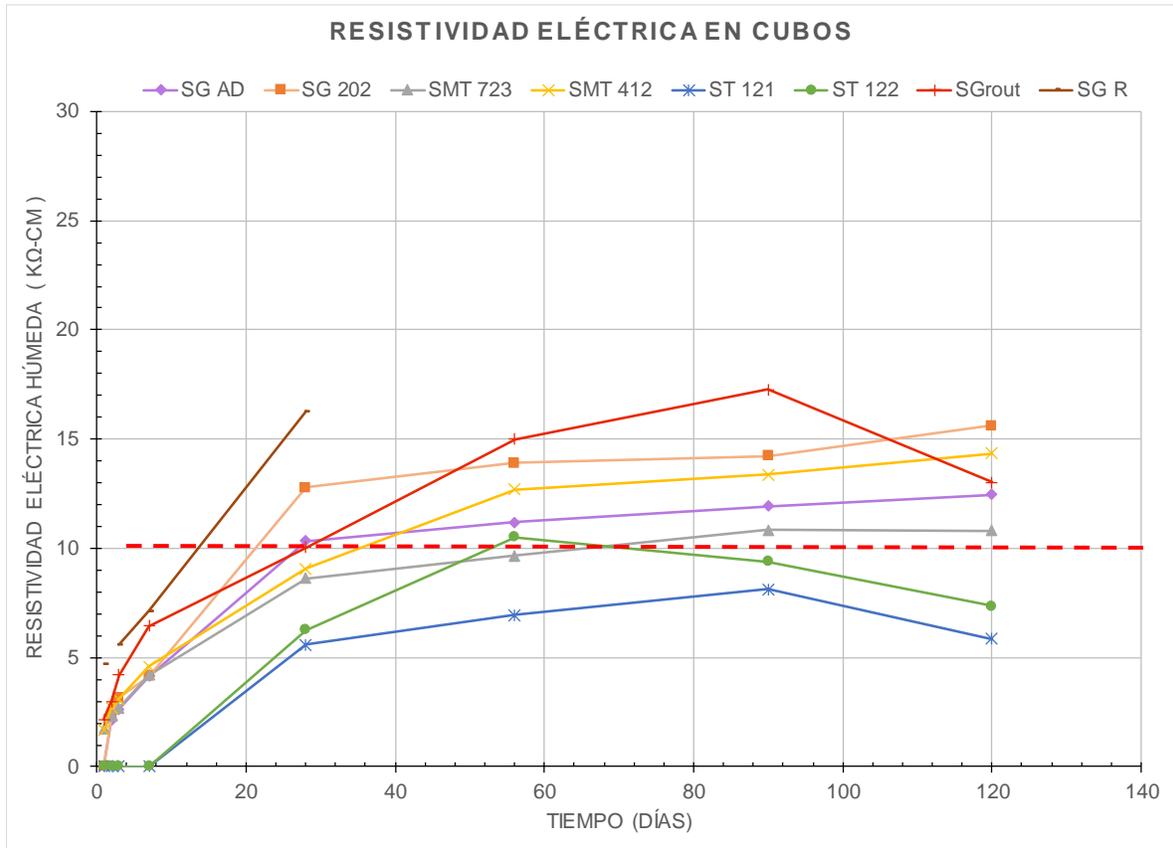


Figura 3.3 Resistividad eléctrica de cubos de 5 x 5 cm

3.3.1 Resistividad eléctrica en cilindros

El mortero que presenta mayor resistividad a los 120 días es el SMT 412 (ver Figura 3.4). La línea roja marca el límite del criterio de aceptación entre riesgo moderado y alto riesgo.

Las resistividades medidas en los cilindros fue muy similar a la conseguida con los cubos, obteniéndose casi todos ubicados en el rango de riesgo moderado y solo una mezcla en el rango de riesgo alto. La resistividad eléctrica es una propiedad del material y no debería haber cambios debido a la geometría, corroborándose aquí esta característica.

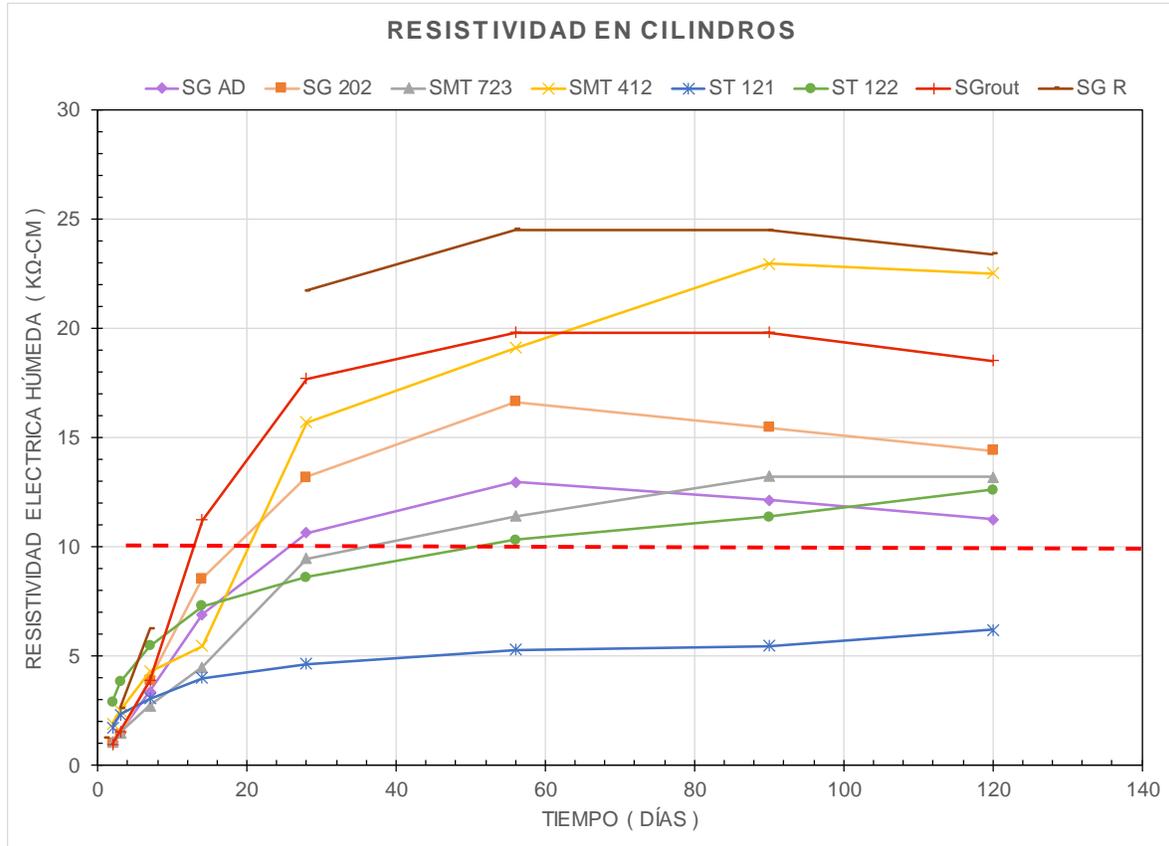


Figura 3.4 Resistividad eléctrica de cilindros de 10 cm x 20 cm

3.4 Velocidad de pulso ultrasónico de cubos y cilindros

Esta prueba denominada velocidad de pulso ultrasónico ayuda únicamente a evaluar si las mezclas fabricadas tienen una homogeneidad entre sí y, de una manera indirecta, la existencia de vacíos en el material. Como el sonido se propaga más rápidamente en materiales sólidos, mientras que la velocidad sea menor, esto implica que el material es muy poroso.

En la actualidad se maneja el criterio para evaluar la durabilidad de materiales porosos, base cemento, con esta prueba como se observa en la Tabla 2.2. Usando estos límites en las Figuras 3.5 y 3.6 se determina cuál de los morteros evaluados cumple los criterios mencionados para la calidad de los mismos.

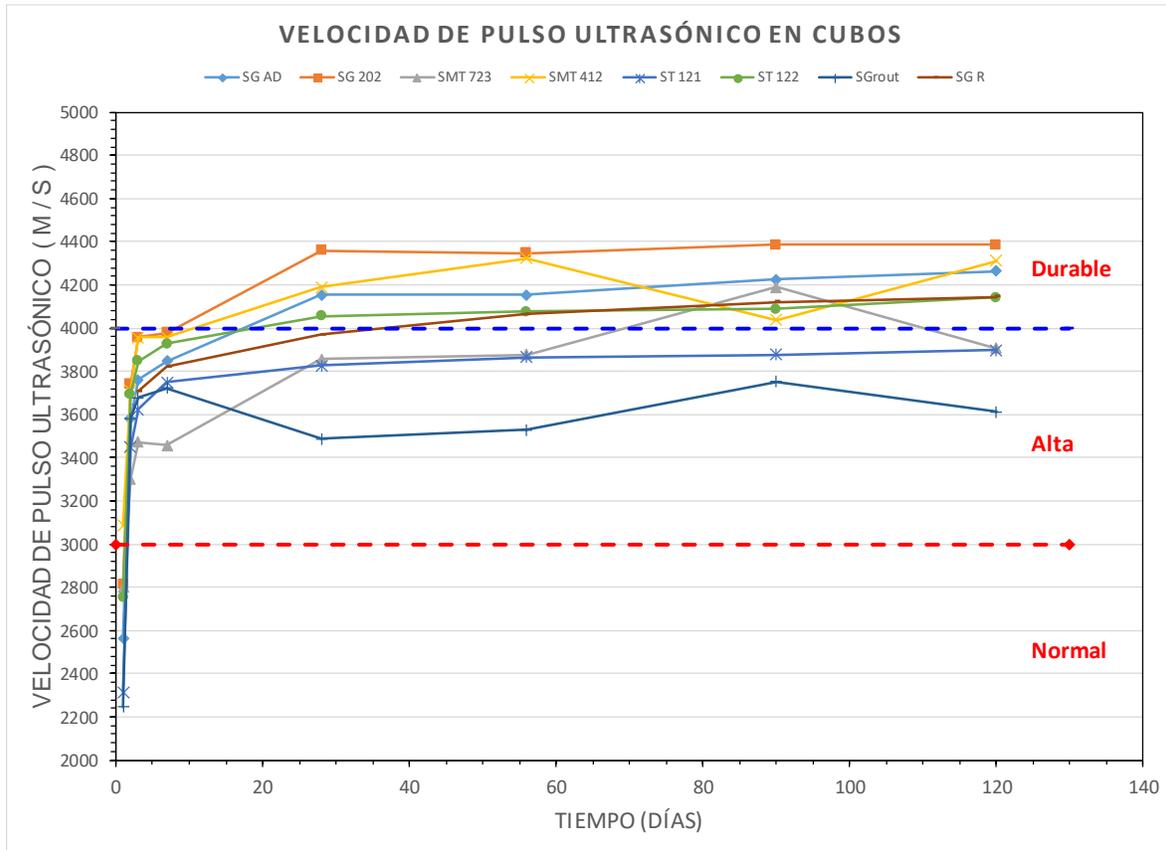


Figura 3.5 Velocidad de pulso ultrasónico en cubos de 5 x 5 cm

Los resultados de velocidad de pulso ultrasónico de todos los morteros mostraron, desde los 28 días, una calidad de alta a durable. Los morteros que presentaron mejor calidad fueron el SMT 412, SG AD, el SG 202 y el SMT 202, que se encontraron en el rango de Calidad Durable.

El SMT 723 y el ST 121 se ubicaron en el rango de calidad alta. Figura 4.5. La línea azul marca el límite entre la Calidad Alta y Durable, la línea roja marca el límite entre la calidad Normal y Alta (ver Figuras 3.5 y 3.6).

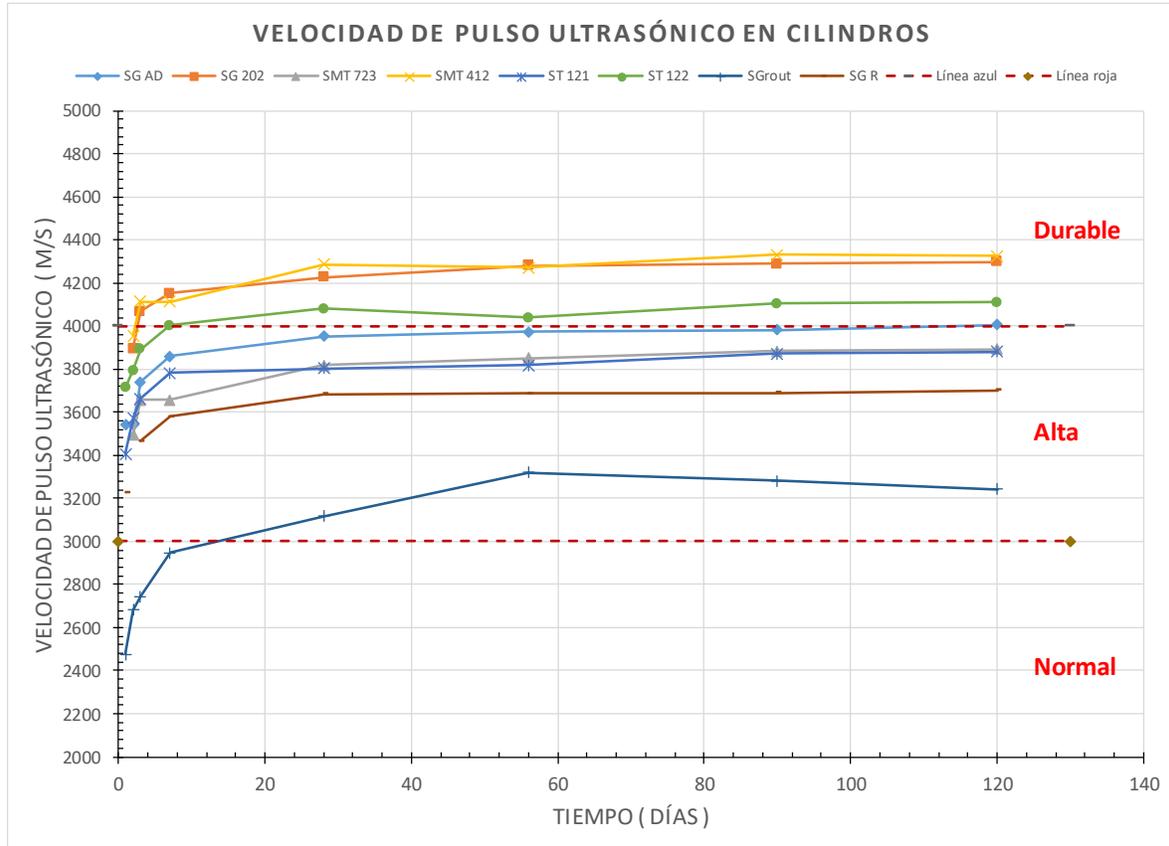


Figura 3.6 Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de 10 cm x 20 cm

3.5 Resistencia a sulfatos

Como se explicó en los procedimientos experimentales seguidos en esta investigación, la medida de la resistencia al ataque de sulfatos de los morteros evaluados se basa en el cambio de longitud de unas barras esbeltas de los morteros evaluados. Esta reacción es producida por la presencia de los aluminatos y ferroaluminatos que se encuentran en los productos hidratados de calcio dentro de la matriz de pasta de cemento. Los productos hidratados conocidos como monosulfatos aluminatos se transforman en otros productos denominados etringita, el cual se expande dentro de un material que ya está sólido, produciendo así expansiones deletéreas al mismo material.

Este cambio de longitud representa las posibles expansiones que pudiera tener el material cuando los productos de hidratación del cemento reaccionan con las altas concentraciones de sulfato que posee la solución de prueba, en donde las barras de cada uno de los morteros son evaluadas.

Los datos obtenidos de las mediciones de resistencia a sulfatos, indican que los morteros ST 121 y 122 son los menos favorables para ser aplicados en ambientes marinos debido al contenido de sulfatos del agua de mar; en cambio los morteros

SGrout, SG AD y SG 202 son los que tienen una más alta resistencia y mejor comportamiento (ver Figura 3.7).

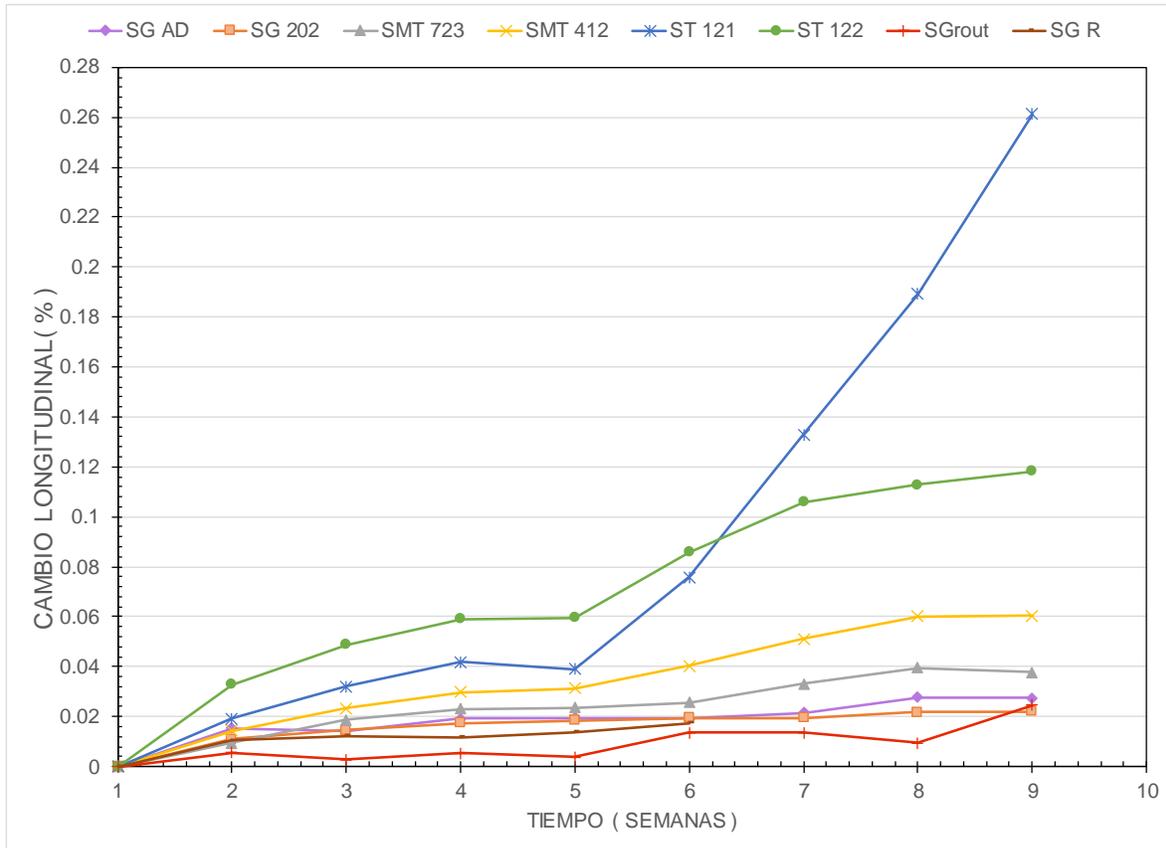
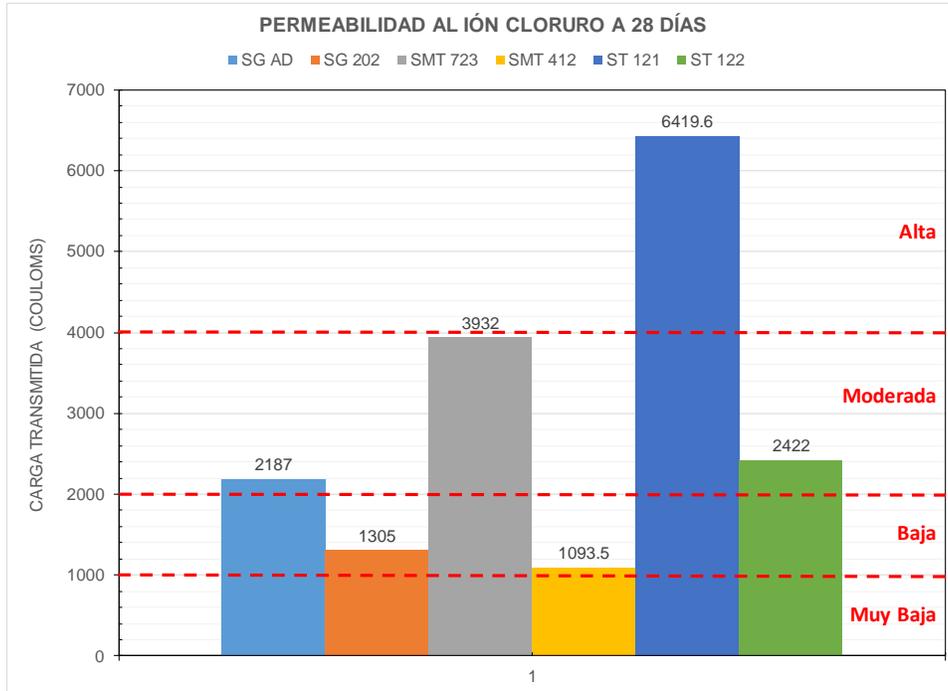


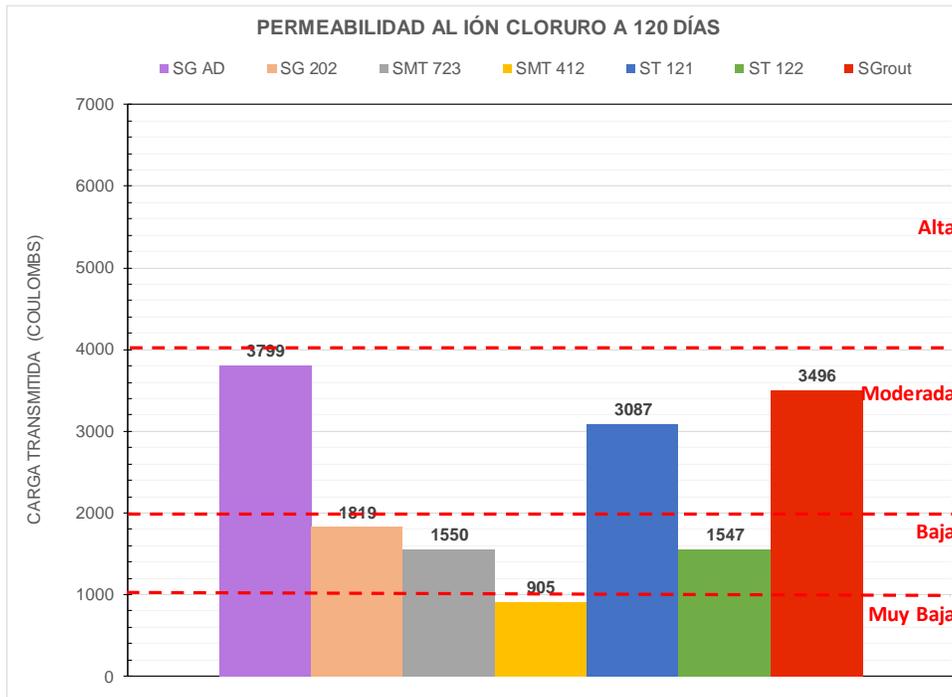
Figura 3.7 Resistencia a sulfatos de barras de 2.5 cm X 2.5 cm X 25 cm

3.6 Permeabilidad al ion cloruro

En la Figura 3.8 se pueden observar los resultados de permeabilidad rápida al ion cloruro. Todos los morteros, excepto el SGrout, disminuyeron la porosidad con el paso del tiempo, lo cual es bueno, ya que los iones cloruro causan el mayor deterioro en el acero de refuerzo. El mortero SMT 412 es el que mejor se desempeña, ya que va de una porosidad baja a los 28 días, a una porosidad muy baja a los 120 días, no así el SGrout que sube de una permeabilidad muy baja a una moderada, lo cual no es conveniente.



(a)



(b)

Figura 3.8 Permeabilidad rápida al ion cloruro: (a) 28 días (b) 120 días

Como puede observarse en esa misma Figura 3.8, a 120 días, todos los morteros (excepto el SGROUT) mantuvieron o disminuyeron el rango de permeabilidad al ion

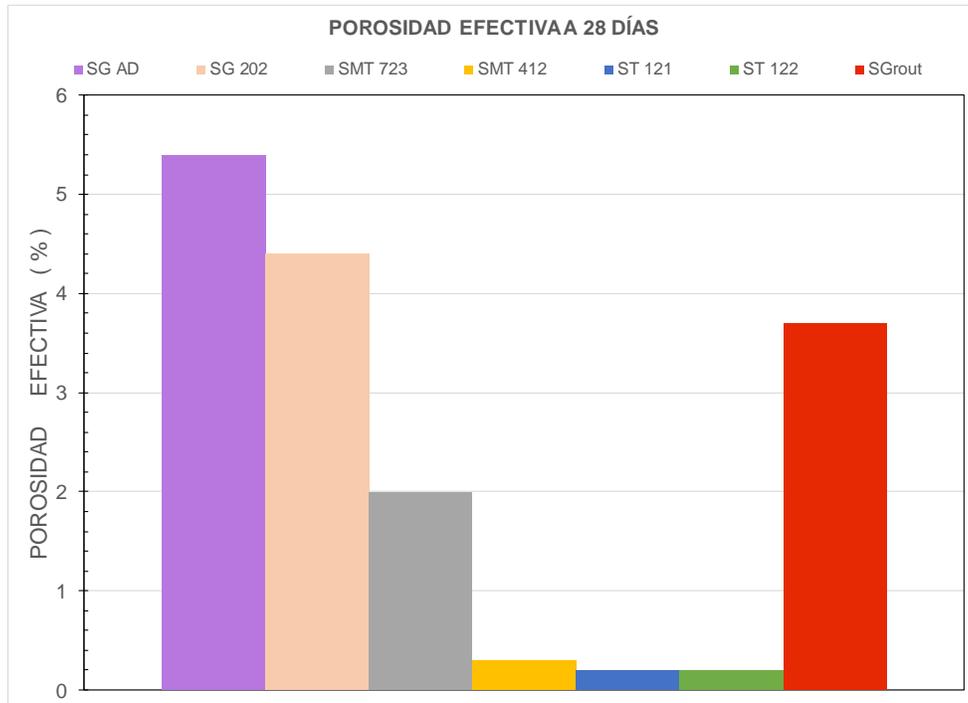
cloruro, lo cual es una buena característica, ya que, a menor permeabilidad, menor es la contaminación de iones cloruro.

3.7 Porosidad efectiva, absorción total y % total de vacíos.

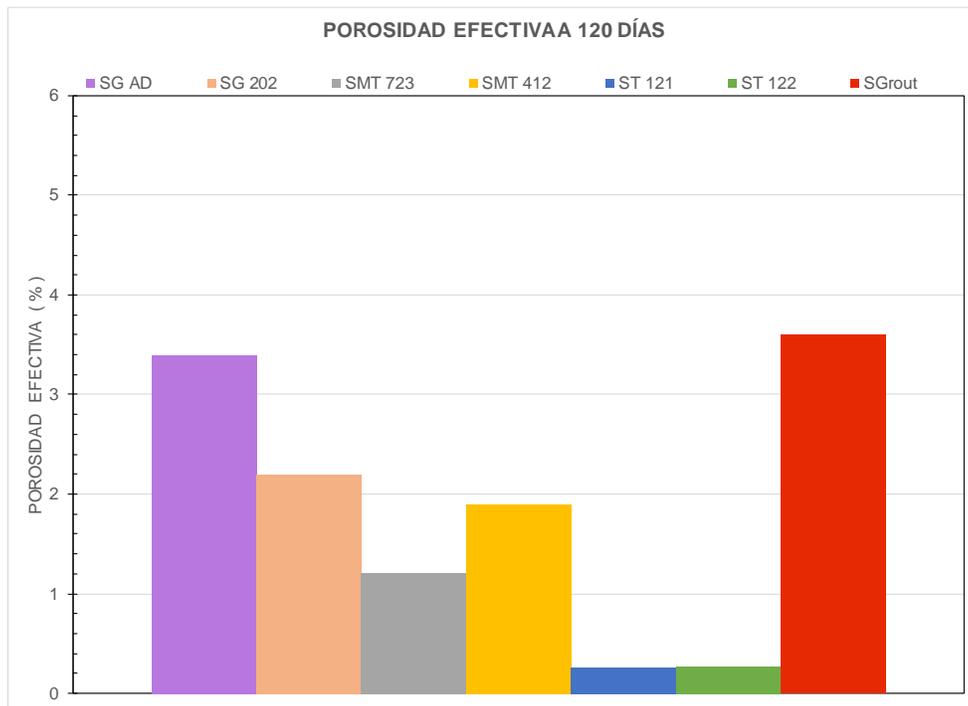
La Figura 3.9 muestra los resultados de los ensayos de porosidad efectiva, lo cual implica que los poros se encuentran interconectados y conectados al exterior, por lo tanto, es el camino hacia la difusión de los materiales agresivos al acero como son los cloruros. Todos los morteros disminuyeron o mantuvieron la porosidad efectiva, excepto el SMT 412, que aumentó 80 por ciento la porosidad después de 120 días, lo que lo hace poco adecuado para su uso en reparaciones marinas.

La Figura 3.10 muestra los resultados de los ensayos de absorción total, el comportamiento es igual al de la porosidad efectiva, en donde, después de 120 días, todos los morteros disminuyeron su capacidad de absorción, excepto el SMT 412, que aumentó 11 por ciento. Esta disminución de absorción implica que ya no se puede dar el movimiento capilar en los poros del concreto abiertos al medio ambiente, lo que impedirá el paso de agentes agresivos al interior del concreto.

La Figura 3.11 muestra los resultados de los ensayos de porcentaje total de vacíos a 28 y 120 días. Nuevamente se presenta el patrón de comportamiento observado en la porosidad efectiva y la absorción total, en este caso, disminuyen los poros permeables a los agresores que atacan al refuerzo, excepto el SMT 412, que aumentó 3 por ciento.

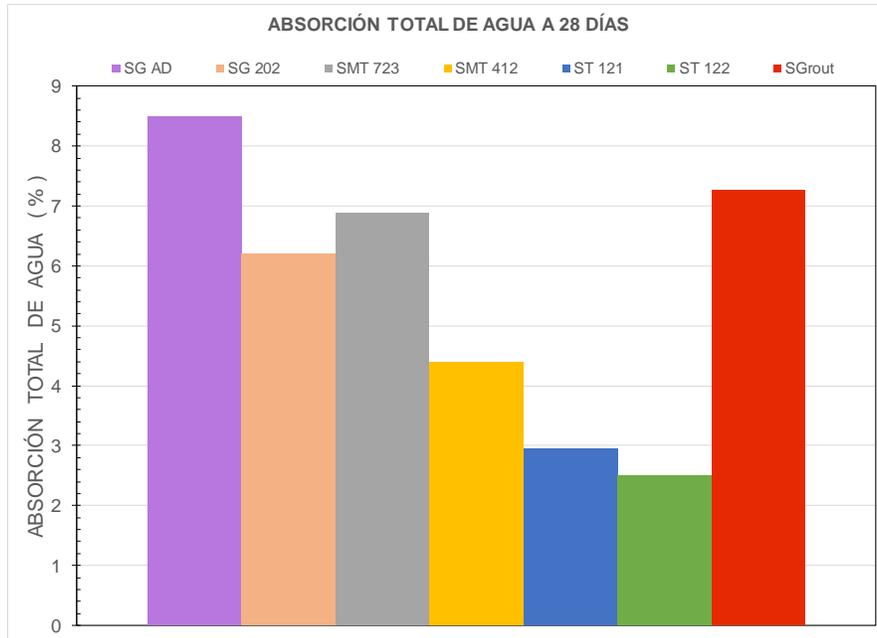


(a)

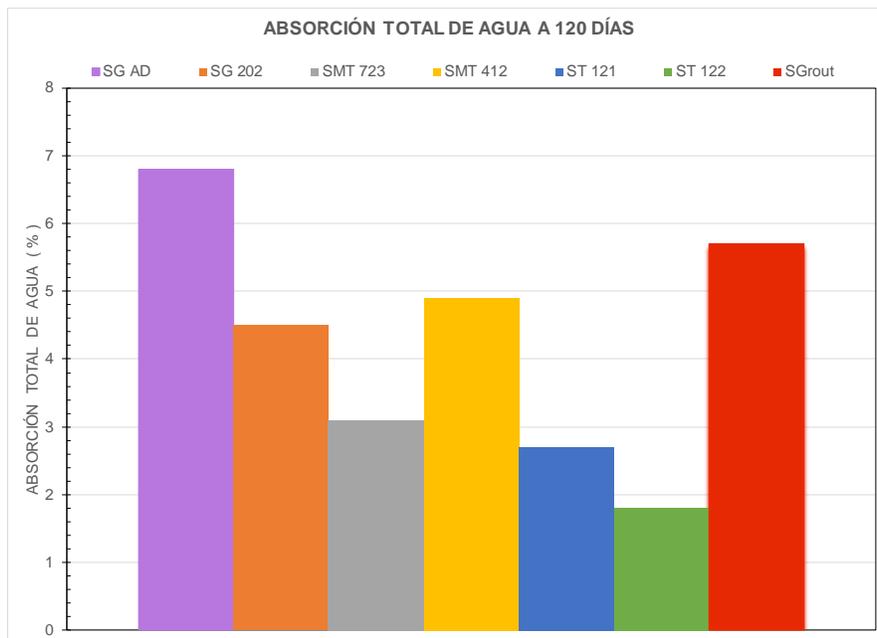


(b)

Figura 3.9 Porosidad efectiva: (a) 28 días y (b) 120 días

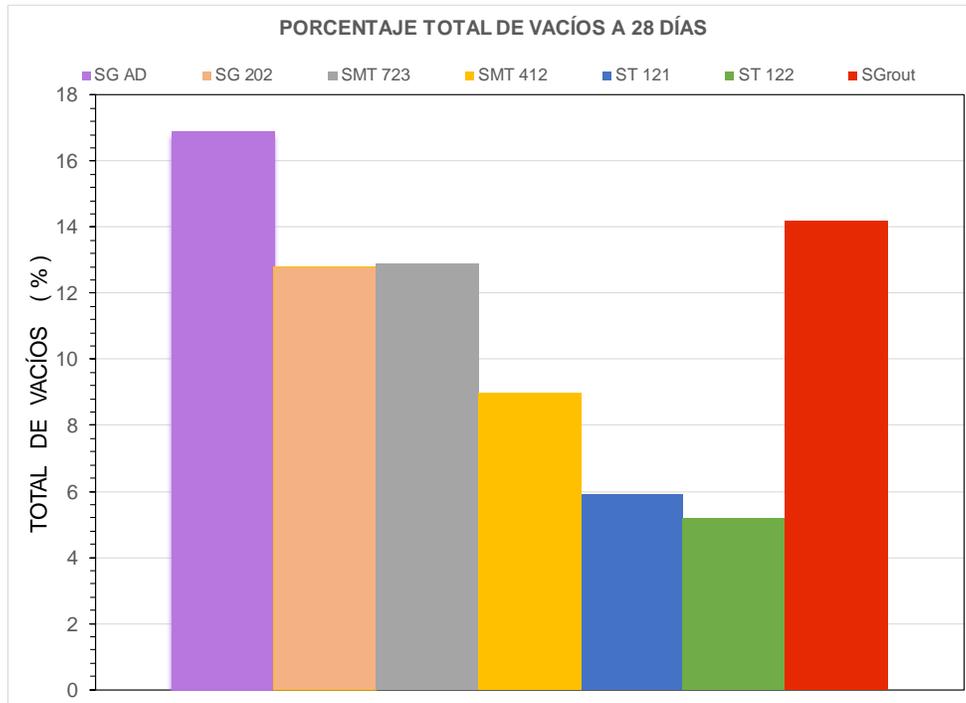


(a)

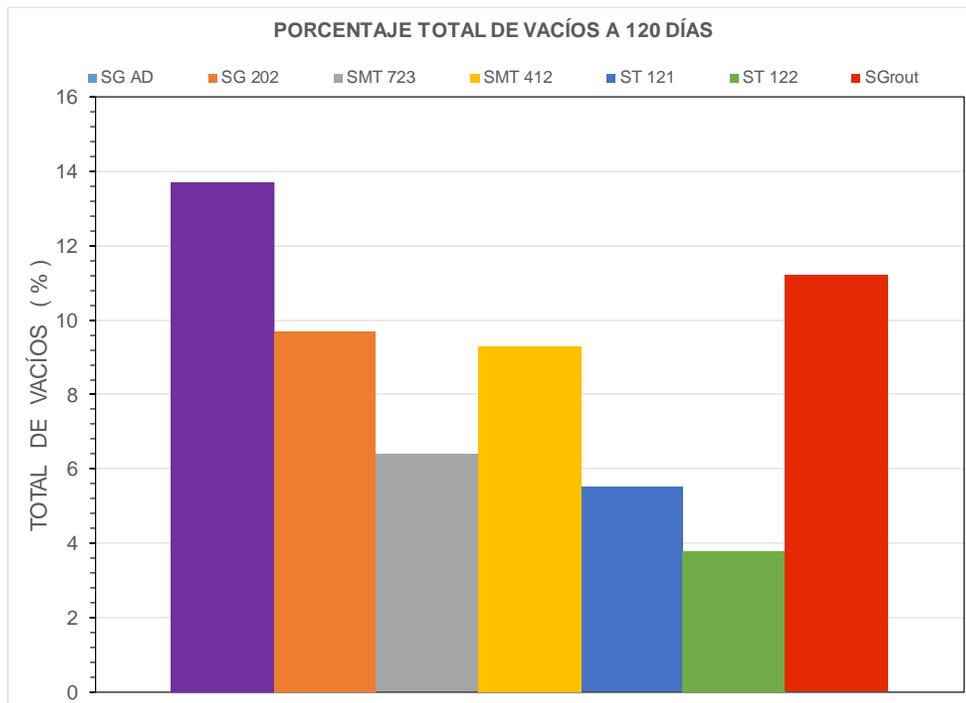


(b)

Figura 3.10 Absorción total de agua: (a) 28 días y (b) 120 días



(a)



(b)

Figura 3.11 Porcentaje total de vacíos a a) 28 días y b) 120 días

3.8 Permeabilidad al agua

La Figura 3.12 muestran los resultados de permeabilidad al agua a 28 días. Como se puede apreciar, sólo el SMT 412, el ST 121 y el ST 122 cumplen el criterio de durabilidad de permeabilidad, lo que implica que para estos morteros la permeabilidad es baja, por lo tanto, los poros son discontinuos y no permitirán pasar los agentes agresivos hacia las varillas de refuerzo.

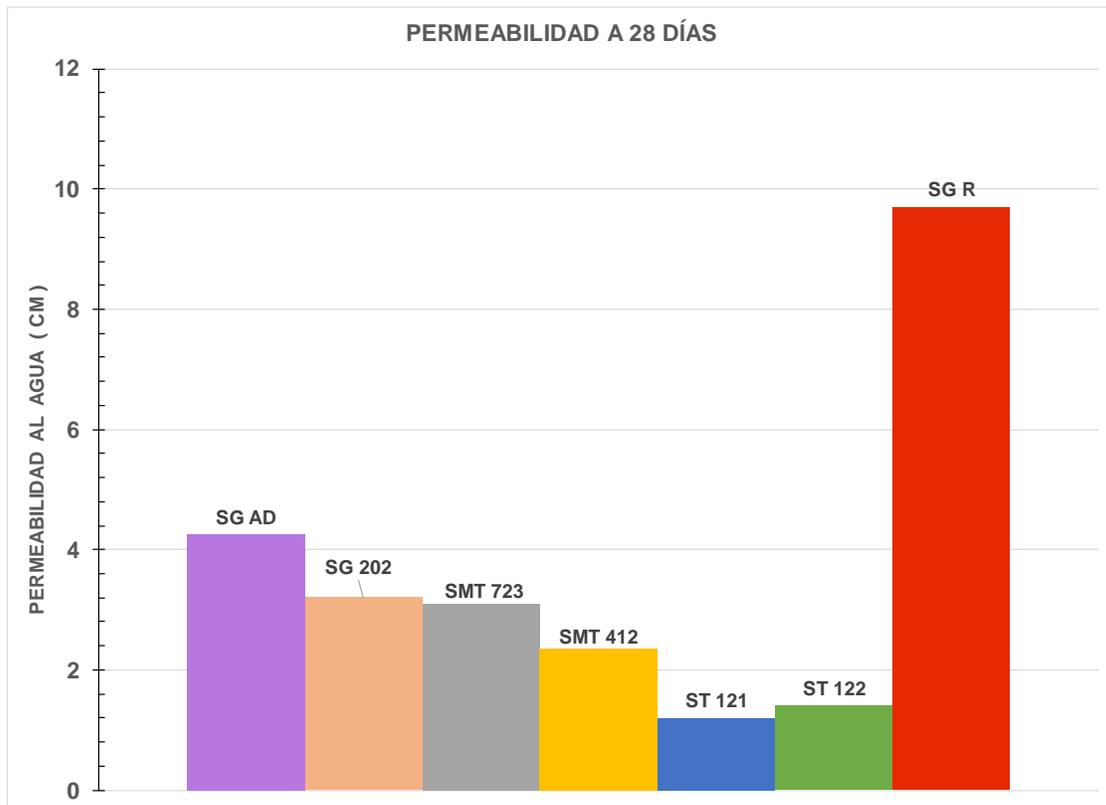


Figura 3.12 Permeabilidad a 28 días

3.9 Evaluación integral por durabilidad

Con base en los resultados experimentales obtenidos, en cada prueba realizada, a cada una de las mezclas de mortero estudiadas, se construyeron las Tablas 3.1 y 3.2, que corresponden a las dos edades evaluadas: 28 y 120 días.

Estas tablas incluyen todas las pruebas realizadas (primera columna) y de la segunda hasta la octava columna, los morteros evaluados. En función del desempeño que mostró cada mortero se calificó a cada uno de ellos del 4 al 10, siendo que el peor desempeño se calificó con un 4 y el mejor desempeño de todos se calificó con un 10. La calificación total, que aparece al pie de cada tabla, corresponde a la sumatoria de cada una de las calificaciones obtenidas para cada mortero evaluado.

Como puede observarse de la Tabla 3.1, el mortero que obtuvo la sumatoria mayor, a 28 días de edad, correspondió al mortero ST122, seguido por SMT412, ST121, SG202, SGAD, SMT723 y por último (con una calificación muy inferior a los demás morteros) el SGrout.

Tabla 3.1. Desempeño de los morteros evaluados a 28 días.

PRUEBA	SG AD	SG 202	SMT 723	SMT 412	ST 121	ST 122	S Grout
Resistencia a la compresión	10	9	4	8	6	7	5
Cambios longitudinales	7	6	5	4	9	10	8
Resistividad eléctrica cubos	7	9	6	8	4	5	10
Resistividad eléctrica cilindros	6	8	7	10	4	5	9
VPU cubos	10	8	6	9	5	7	4
VPU cilindros	7	9	6	10	5	8	4
Resistencia a los sulfatos	6	5	7	8	10	9	-
Permeabilidad al ion cloruro	8	9	6	10	5	7	4
Permeabilidad al agua	5	6	7	8	10	9	4
Porosidad efectiva	4	5	7	8	9	10	6
Absorción Total	4	7	6	8	9	10	5
Total Vacíos	4	7	6	8	9	10	5
TOTAL	102	114	102	124	121	131	46

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos para todos los morteros en las pruebas a 120 días de edad. El mortero que obtuvo la sumatoria mayor, a 120 días de edad, correspondió de nuevo al mortero SG202, seguido por SMT412, SGAD, ST122, SMT723, ST121 y por último el SGrout. Como puede observarse, el desempeño a 120 días modificó la posición del desempeño obtenido a los 28 días en todos los morteros evaluados en esta investigación. Esto demuestra que el

producto activador de cada uno de los morteros evaluados no reacciona de igual manera, siendo unos más lentos que otros para reaccionar y mejorar el producto.

Tabla 3.2. Desempeño de los morteros evaluados a 120 días.

PRUEBA	SG AD	SG 202	SMT 723	SMT 412	ST 121	ST 122	SGrout
Resistencia a la compresión	10	8	5	7	6	9	4
Cambios longitudinales	6	8	9	10	5	4	7
Resistividad eléctrica	10	8	6	9	5	7	4
VPU	7	10	6	9	4	5	8
Resistencia a los sulfatos	8	9	7	6	4	5	10
Permeabilidad al ion cloruro	10	7	6	4	8	5	9
Porosidad efectiva	5	6	8	7	9	10	4
Absorción Total	4	7	8	6	9	10	5
%Total Vacíos	5	6	7	8	10	9	4
TOTAL	65	69	62	66	60	64	55

4 CONCLUSIONES

Los morteros ST no son aptos para utilizarse como material de reparación o rehabilitación en ambientes marinos ya que muestran mayor absorción de ion cloruro y absorción de sulfatos; sin embargo, puede utilizarse para otra aplicación por lo que sus demás características están dentro del rango medio de durabilidad.

El mortero SG 202 presenta mejores características en relación a los demás materiales, en toda la caracterización presenta resultados dentro de los criterios aceptables, se dejará la aplicación de acuerdo a los requerimientos del proyecto en cuestión.

En cuanto a la resistividad eléctrica, que es el principal criterio en los materiales analizados, la mayoría de los morteros están dentro del riesgo moderado así que se dejará la aplicación de acuerdo con las especificaciones del proyecto.

A las dos edades ensayadas de 28 y 120 días los morteros ST mantienen los valores más bajos de porosidad efectiva, absorción total y porcentaje total de vacíos en relación a los demás morteros. Sin embargo, como se observó en los resultados obtenidos por ataque de sulfatos, éstos son los más susceptibles a sufrir daños por este tipo de ataque químico, por lo que se recomienda tener especial cuidado en su uso en este tipo de ambiente.

Bibliografía

ASTM C1202-12(2012) “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”

ASTM C157/C157M – 08 “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete”.

NMX C-414-ONNCCE 2004. (2004): "Industria de la construcción-Cementos hidráulicos-Especificaciones y Métodos de prueba”

NMX-C-083-ONNCCE-2016. (2016) “Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes – Método de ensayo”.

NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016) “Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes de ensayo (Cancela a la NMX-C-159-ONNCCE-2004 y NMX-C-160-ONNCCE-2004).

NMX-C-275-ONNCCE-2004 (2004) “Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la Velocidad de pulso a través del concreto – Método de Ultrasonido (Cancela a la NMX-C-275-1986).

NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015) “Industria de la construcción –Determinación de la absorción capilar en concreto hidráulico – Método de Ensayo.

NMX-C-514-ONNCCE-2016. (2016) “Industria de la construcción – Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico – Especificaciones y métodos de ensayo.

Torres Acosta, A.A., Celis Martínez, C.E., Martínez Molina, W. y Lomelí González, M.G. (2010). “Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas,” Publicación Técnica 326, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, ISSN: 0188-7297.

Torres Acosta, A.A., Pérez Gallardo, A., Martínez Molina, W. y Lomelí González, M.G. (2010). “Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto,” Publicación Técnica 328, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, ISSN: 0188-7297.

UNE-EN 12390/NTC 4483 Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto.



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad certificada bajo la norma ISO 9001:2015