



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

## Facultad de Ingeniería Civil

**“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con  
sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de  
Horno y Agregado Reciclado a edades tardías  
mediante pruebas de Durabilidad”**

**TESIS**

Para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presenta:

**DANIELA GARCÍA ROMERO**

Asesor:

**Dr. LUIS HUGO CHÁVEZ GARCÍA**

Coasesor interno:

**M.I.T. CIPRIANO BERNABÉ REYES**

Coasesor externo:

**Dr. GERARDO DEL JESÚS FAJARDO SAN MIGUEL**



Morelia Michoacán, noviembre 2021



## Resumen

En este proyecto se realizó un estudio del comportamiento a edad tardía de la utilización de Ceniza de Horno de la elaboración de ladrillos (ABMP) y Ceniza de Bagazo de Caña (SCBA) como sustitutos ecológicos en un 10% de Cemento Portland Compuesto en la elaboración de mezclas de concreto hidráulico, así como la sustitución del agregado triturado convencional (CCA) con un Agregado de Concreto Reciclado producto de demolición (RCA) en un 50%, además del empleo de relaciones agua/cementos 0.45 y 0.65. El objetivo es aprovechar los residuos de la industria agrícola y de la construcción, y, a su vez mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico. La SCBA se obtuvo del ingenio azucarero de Taretán, Michoacán, México. Para su uso fue necesario tamizarla y utilizando aquella que pasó la malla ASTM 100. La ABMP proviene de Tenencia Morelos, Morelia, Michoacán, México, la cual requirió reducción de tamaño en un molino de bolas y posterior tamizado, utilizando la que pasa por la malla ASTM 200. La RCA se obtuvo de la extracción de bloques de concreto producto de la demolición de la torre médica del IMSS en la ciudad de Morelia, Michoacán, los cuales posteriormente fueron sometidos a una trituración para obtener los tamaños adecuados de agregado grueso. La arena de origen volcánico que se utilizó proviene del banco de materiales “La Unión” en Joyitas, Morelia, Michoacán, México. Se diseñaron y fabricaron las mezclas de concreto hidráulico mediante los métodos de diseño del ACI y normativa mexicana, posteriormente se elaboraron especímenes cilíndricos de 10cmx20cm, prismas de 6cmx6cmx26cm y prismas de 5cmx15cmx25cm con acero embebido en el concreto. Los especímenes fueron evaluados a 1400 días, probando sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad, mediante ensayos no destructivos: Resistividad Eléctrica, Absorción, Frecuencia de Resonancia Longitudinal; pruebas destructivas: Compresión Simple, Módulo de Elasticidad Estático; y pruebas electroquímicas para evaluar la probabilidad de corrosión del acero de



refuerzo: Potenciales de Corrosión y Velocidad de Corrosión. Las mezclas con sustituciones del 10% de SCBA obtuvieron resultados favorables, sobrepasando los valores de las mezclas Control en la mayoría de pruebas, lo que se interpreta como un aumento de sus propiedades físico-mecánicas. El uso de cenizas disminuye la porosidad de las mezclas, mientras el CCA aumenta las propiedades mecánicas de los especímenes de concreto hidráulico, lo que permite una menor difusión de los agentes patógenos que provocan la despasivación del acero y por lo tanto una menor velocidad de corrosión.

**Palabras clave:** Sustituciones ecológicas, concreto hidráulico, durabilidad, corrosión, porosidad.

## Abstract

In this project, a study was carried out on the late-age behavior of the use of Ash of Brick Making Process (ABMP) and Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) as ecological substitutes in 10% of Composite Portland Cement in the elaboration of hydraulic concrete mixtures, as well as the replacement of the conventional crushed aggregate (CCA) with a Recycled Concrete Aggregate product of demolition (RCA) by 50%, in addition to the use of water/cement ratios 0.45 and 0.65. The objective is to take advantage of waste from the agricultural and construction industry, and in turn, improve the physical-mechanical properties of hydraulic concrete. The SCBA was obtained from the Taretan sugar mill, Michoacán, Mexico. For its use it was necessary to sift it and using the one that passed the ASTM 100 mesh. The ABMP comes from Tenencia Morelos, Morelia, Michoacán, Mexico, which required size reduction in a ball mill and subsequent sieving, using the one that passes through the ASTM 200 mesh. The RCA was obtained from the extraction of concrete blocks resulting from the demolition of the IMSS medical tower in the city of Morelia, Michoacán, which were subsequently crushed to obtain the appropriate sizes of aggregate. The sand of volcanic origin that was used comes from the



material bank "La Unión" in Joyitas, Morelia, Michoacán, Mexico. Hydraulic concrete mixes were designed and manufactured using ACI design methods and Mexican regulations. 10cmx20cm cylindrical specimens, 6cmx6cmx26cm prisms and 5cmx15cmx25cm prisms with steel embedded in the concrete were elaborated. The specimens were assessed at 1400 days, testing their physical-mechanical properties and durability, through non-destructive tests: Electrical Resistivity, Absorption, Longitudinal Resonance Frequency; destructive tests: Simple Compression, Static Elasticity Modulus; and electrochemical tests to evaluate the probability of corrosion of reinforcing steel: Corrosion Potentials and Corrosion Rate. The mixtures with substitutions of 10% of SCBA obtained favorable results, exceeding the values of the Control mixtures in most tests, which is interpreted as an increase in their physical-mechanical properties. The use of ash decreases the porosity of the mixtures, while the CCA increases the mechanical properties of hydraulic concrete specimens, which allows a lower diffusion of pathogens that cause steel depassivation and therefore a lower corrosion rate.

**Keywords:** Environmentally friendly substitutions, hydraulic concrete, durability, corrosion, porosity.



## Dedicatorias

A mis padres: Flor de Guadalupe Romero Rentería y Daniel García Hernández; por criarme en un hogar lleno de valores y buenas costumbres. Son mis guías, son mi puerto seguro en esta vida. De ustedes siempre he obtenido buenos consejos con honestidad y sobre todo amor incondicional que nos muestran día con día a mí y mis hermanos. Los amo mucho.

A mis hermanos: Sofía García Romero y Ricardo García Romero; ustedes son parte importante de mi vida, en las buenas y en las malas este lazo fraterno no ha hecho más que fortalecerse, me hacen una orgullosa hermana mayor.

## Agradecimientos

A mis padres y hermanos, por su apoyo constante, no solo a lo largo de la carrera, sino de toda mi vida. Gracias por toda la ayuda, entrega y esfuerzo. Así como el resto de mi familia, primos, tíos y hermanos.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrirme las puertas desde mi formación media superior en el Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo, así como mi formación profesional dentro de la Facultad de Ingeniería Civil. Por ocho años ha sido parte de mi crecimiento y de por vida estará en mi corazón.

A mi asesor, el Dr. Luis Hugo Chávez García, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación. Gracias Doctor por aceptarme como su tesista y confiar en mi trabajo.

A el M.I.T. Cipriano Bernabé Reyes, por su ayuda a lo largo de la investigación como mi coasesor, por sus consejos y asesorías para realizar las pruebas e interpretar los resultados. Y de siempre tener disponibilidad para responder mis dudas.



A la M.I.T. Sandra del Carmen Arguello Hernández, porque con la mayor amabilidad nos motivaba a continuar nuestro trabajo a todos los tesisistas. Usted siempre se hizo espacio para escuchar mis dudas y responderlas con toda la claridad posible, así como darme las herramientas para continuar.

A la sección de Resistencia de Materiales del Laboratorio “Ingeniero Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, y a todos quienes forman parte de él, por su ayuda muchas gracias a la Maestra Cindy Lara, al Maestro Noel Díaz, Dr. Wilfrido Molina, Dra. Elia Mercedes Alonso, Dr. Marco Antonio Navarrete, Don Jesús, Beto, Blancas, Meli, Víctor, Uriel.

Quiero agradecer a todos los profesores con los que tuve la suerte de cruzar caminos a lo largo de la carrera, por sus enseñanzas y sabiduría.

A mis amigos de la licenciatura: mis queridos Paques: Adrián, Memo, Paque; al grupo de los checos: Carlos, Checo, Charls y Ale, también a mis amigos Christian, Adriana, Fany y Ramsés. Gracias a todos por los momentos que ahora forman parte de las mejores anécdotas, las risas y chistes locales, así como su amistad incondicional. Los amo muchos amigos.

A mis compañeros tesisistas y amigos Saúl y Miriam, por convertir la experimentación en todo un musical. Gracias a todos los chicos del servicio Iván, Juan Carlos, Leslie, Adrián, Lalo, Juan, y los demás.

Gracias a mis amigos de la vida Anny, David, Naomi, Ana, Adri, Elliot, Alex, Reyes, Ponce, Alexia, Yuli. Los quiero por siempre.



# Índice

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>XVI</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>XIX</b>
PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	XIX
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>XX</b>
OBJETIVO GENERAL.....	XX
OBJETIVOS PARTICULARES .....	XX
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>XXI</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. <i>Revisión del Estado del Arte</i> .....	3
1.1.1. Clasificación de las puzolanas .....	5
1.1.1.1. Definición de ceniza volante:.....	6
1.1.1.2. Tipos y usos de puzolanas .....	7
2. MATERIALES .....	23
2.1. <i>Durabilidad de estructuras de concreto reforzado</i> .....	23
2.1.1. Etapa 1. Planeación de vida de servicio de proyecto (arquitectónico, estructural y de durabilidad).....	23
2.1.1.1. Generalidades.....	23
2.1.1.2. Clasificación según el ambiente agresivo de exposición. ....	25
2.1.1.3. Requisitos de durabilidad. ....	26
2.2. <i>Tipo de cemento, agregado pétreos, sustituciones y adiciones.</i> .....	28
2.2.1. Cemento.....	28



## “Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”



2.2.1.1.	Proceso de fabricación del cemento. ....	28
2.2.1.2.	Clasificación y tipos de cemento .....	31
2.2.1.3.	Especificaciones.....	32
2.2.1.4.	Cemento utilizado en la investigación.....	33
2.2.2.	Agregados pétreos .....	34
2.2.2.1.	Especificaciones.....	34
2.2.2.2.	Agregado utilizado en la investigación .....	36
2.2.3.	Sustituciones puzolánicas .....	38
2.2.4.	Adiciones.....	40
2.2.4.1.	Fluidificante .....	40
2.2.4.2.	Agua.....	42
3.	METODOLOGÍA.....	43
3.1.	<i>Procedimientos de prueba en la caracterización de los materiales.....</i>	<i>43</i>
3.1.1.	Cemento.....	43
3.1.1.1.	Consistencia normal del cemento hidráulico. ....	44
3.1.1.2.	Tiempo de fraguado del cemento hidráulico.....	46
3.1.1.3.	Determinación de la Densidad del cemento hidráulico.....	49
3.1.2.	Agregado grueso y fino .....	51
3.1.2.1.	Trituración del agregado Reciclado (RCA) producto de demolición. ....	51
3.1.2.2.	Cuarteo del agregado .....	52
3.1.2.3.	Humedad actual. ....	54
3.1.2.4.	Humedad de absorción. ....	55
3.1.2.5.	Densidad.....	57
3.1.2.6.	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta (MVSS). ....	58
3.1.2.7.	Determinación de la masa volumétrica seca y varillada (MVSV).....	59
3.1.2.8.	Granulometría en el agregado fino (arena).....	60
3.1.2.9.	Granulometría en el agregado grueso (grava).....	63
3.1.2.10.	Colorimetría en arenas. ....	65
3.1.2.11.	Sedimentación en arenas. ....	66
3.1.2.12.	Material que pasa por la malla No. 200.....	67
3.1.2.13.	Equivalente de arena.....	68
3.1.2.14.	Terrones de arcilla en agregados.....	70
3.1.3.	Sustituciones de cemento.....	72
3.1.3.1.	Secado de la ceniza.....	72
3.1.3.2.	Pulverización de las cenizas.....	73
3.1.3.3.	Granulometría de las cenizas posteriores al proceso de pulverización.....	74
3.1.4.	Adiciones.....	74
3.1.4.1.	Fluidificante .....	74



“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”



3.1.4.2.	Agua.....	75
3.2.	<i>Diseño y elaboración de mezclas por el método del ACI</i> .....	76
3.2.1.	Diseño ACI .....	76
3.2.2.	Mezclas control o testigo .....	83
3.2.3.	Mezclas con adición de Ceniza de Horno (ABMP)).....	83
3.2.4.	Mezclas elaboradas con Ceniza de Bagazo de Caña (SCBA) .....	83
3.3.	<i>Pruebas al concreto hidráulico</i> .....	84
3.3.1.	Revenimiento del concreto de Cemento Hidráulico .....	84
3.3.2.	Elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio .....	85
3.3.3.	Curado de especímenes de prueba en el laboratorio .....	89
3.3.4.	Cabeceo de Especímenes cilíndricos de concreto hidráulico .....	90
3.4.	<i>Pruebas no destructivas</i> .....	92
3.4.1.	Resistividad eléctrica.....	92
3.4.2.	Prueba de Fagerlund (Absorción capilar en concreto hidráulico) .....	97
3.4.3.	Frecuencia de resonancia.....	105
3.5.	<i>Pruebas Destructivas</i> .....	110
3.5.1.	Compresión simple .....	110
3.5.2.	Módulos de elasticidad estático.....	112
3.6.	<i>Pruebas Electroquímicas (Corrosión)</i> .....	116
3.6.1.	Potencial de Corrosión .....	118
3.6.2.	Velocidad de Corrosión .....	123
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	131
4.1.	<i>Resultados de pruebas a los materiales</i> .....	131
4.1.1.	Resultados de análisis al Cemento.....	131
4.1.1.1.	Densidad.....	131
4.1.1.2.	Consistencia normal y tiempos de fraguado. ....	131
4.1.2.	Resultados de pruebas físicas a los agregados pétreos .....	132
4.1.2.1.	Granulometría de agregado fino (arena) de “La Unión” .....	133
4.1.2.2.	Granulometría de los agregados gruesos. ....	134
4.1.3.	Resultados del análisis del agua usada para elaborar las mezclas de concreto .....	135
4.2.	<i>Resultados de pruebas no destructivas</i> .....	136
4.2.1.	Resultados de Resistividad eléctrica .....	136
4.2.2.	Resultados de Frecuencia de Resonancia Longitudinal.....	140
4.2.3.	Resultados de Prueba de Fagerlund (porosidad efectiva, Densidad y gravedad específica). 141	
4.3.	<i>Resultados de pruebas destructivas.</i> .....	145
4.3.1.	Resultados de ensayo a compresión simple .....	145
4.3.2.	Resultados del ensayo de Módulos de elasticidad estático. ....	149



4.4.	<i>Resultados de Pruebas Electroquímicas (Corrosión)</i> .....	150
4.4.1.	Resultados de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) .....	150
4.4.2.	Resultados de Velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ) .....	154
5.	CONCLUSIONES .....	160
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		<b>162</b>

## Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Clasificación de los RA</i> .....	17
<i>Ilustración 2. Modelo conceptual de 7 etapas</i> .....	23
<i>Ilustración 3. Etapa 1 del proceso de fabricación del cemento. (Kosmatka, Steven, &amp; al., 2004.)</i> .....	29
<i>Ilustración 4. Etapas en la producción moderna del cemento Portland, a través del proceso seco (Kosmatka, Steven, &amp; al., 2004.)</i> .....	30
<i>Ilustración 5 Cemento utilizado para elaboración de mezclas de concreto CPC 30R-RS</i> .....	33
<i>Ilustración 6. Arena de origen volcánico, proveniente del banco de materiales “La unión”. (García Romero, 2021)</i> .....	36
<i>Ilustración 7. Banco de Materiales “La Unión” Joyitas. Macrolocalización (izquierda) y microlocalización (derecha). (Google Maps, 2021)</i> .....	36
<i>Ilustración 8. Trituradora TRICKAL, macrolocalización (izquierda), microlocalización (derecha). (Google Maps, 2021)</i> .....	37
<i>Ilustración 9. Grava Triturada proveniente del trituradora TRICKAL (García Romero, 2021)</i> .....	37
<i>Ilustración 10. Agregado de concreto reciclado producto de demolición (RCA) (García Romero, 2021)</i> .....	38
<i>Ilustración 11. Torre del IMSS de donde se obtuvo el agregado reciclado producto de su demolición. (Jiménez, La Voz de Michoacán, 2020)</i> .....	38
<i>Ilustración 12. El ingenio Pedernales. (Ingenios Santos)</i> .....	39
<i>Ilustración 13. Mapa de tenencia Morelos (Google Maps, 2021)</i> .....	39
<i>Ilustración 14. Tenencia Morelos, Morelia, Michoacán, México. (Jiménez, 2019)</i> .....	39
<i>Ilustración 15. Leña de Pino utilizada para la quema de los hornos en que se cocerán los ladrillos. (Bernabé Reyes, 2012)</i> .....	40
<i>Ilustración 16. Extracción de la ceniza del horno de cocción del ladrillo, utilizando palas. (Bernabé Reyes, 2012)</i> .....	40
<i>Ilustración 17. Esquema de secuencia de la metodología experimental.</i> .....	43



Ilustración 18. Aparato de Vicat (NMX-C-059-ONNCCE-2017).....	47
Ilustración 19. Matraz de Le Chatelier (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011) .....	50
Ilustración 20. . Especímenes prismáticos y cilíndricos que se someterán a pruebas de durabilidad (García Romero, 2021) .....	88
Ilustración 21. Especímenes cilíndricos de 10x20cm. (García Romero, 2021) .....	88
Ilustración 22. Especímenes paleta de 25x5x15cm (García Romero, 2021) .....	88
Ilustración 23. Especímenes prismáticos de 6x6x26cm. (García Romero, 2021).....	89
Ilustración 24. Especímenes cilíndricos y prismáticos en pila de curado. (García Romero, 2021).....	90
Ilustración 25. Especímenes prismáticos de 6x6x26cm de la mezcla Testigo con agregado reciclado con una relación a/c=0.65 (García Romero, 2021) .....	93
Ilustración 26. Especímenes prismáticos de 6x6x26cm de la mezcla con sustituto de Ceniza de Bagazo de Caña, con agregado triturado y la relación a/c=0.45 (García Romero, 2021).....	93
Ilustración 27. Equipo necesario para realizar prueba de resistividad eléctrica. (García Romero, Daniela).....	94
Ilustración 28. Resistómetro marca Nilsson. ....	95
Ilustración 29. Montaje del espécimen para el método directo (NMX-C-514-ONNCCE-2016).....	95
Ilustración 30. Enumeración de las probetas prismáticas. (García Romero, 2021).....	95
Ilustración 31. Medición de espesor de las probetas prismáticas que se someterán a resistividad eléctrica. (García Romero, 2021).....	95
Ilustración 32. Toma de temperatura hasta que sea constante de espécimen prismático (García Romero, 2021).....	95
Ilustración 33. Colocación del espécimen con sustitución de Ceniza de Horno, agregado triturado y relación a/c=0.65. (García Romero, 2021) .....	95
Ilustración 34. Realización del método directo de la prueba de durabilidad de resistividad eléctrica con el aparato de Nilsson (García Romero, 2021) .....	96
Ilustración 35. Especímenes cilíndricos para prueba de Fagerlund (García Romero, 2021).....	100
Ilustración 36. Cortado de cilindros para prueba de absorción con cortadora de disco con enfriador de agua (García Romero, 2021) .....	100
Ilustración 37. Horno para secado a 50°C. ....	100
Ilustración 38. Masa seca después de reposo de 15 días de cilindro de mezcla Testigo con agregado triturado y una relación a/c=0.45 .....	100
Ilustración 39. Medición de 4 diámetros con Vernier.....	101
Ilustración 40. Sellado con parafina en la superficie lateral de cada espécimen .....	101



<i>Ilustración 41. Especímenes cubiertos con parafina para el sellado. ....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 42. Toma de masa de rodajas de concreto con sellado de parafina, plástico y liga elástica. ....</i>	<i>101</i>
<i>Ilustración 43. El recipiente plástico con esponja y agua que cubre 3mm de la muestra colocada con la superficie de ensayo del espécimen sobre la esponja .....</i>	<i>102</i>
<i>Ilustración 44. Masa de Testigo con agregado triturado y relación a/c=0.65 a los 60s de inmersión</i>	<i>102</i>
<i>Ilustración 45. "E-METER" mostrando la mesa de trabajo electrodinámica con un "generador de vibraciones de contacto" y un receptor de contacto de acelerómetro piezoeléctrico. Dispuesto para ensayo de resonancia longitudinal de un prisma de concreto. (NDT- JAMES INSTRUMENTS INC. NON DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS) .....</i>	<i>108</i>
<i>Ilustración 46Especímenes prismáticos de 6x6x26cm utilizados para la prueba de frecuencia de resonancia longitudinal.(García Romero, 2021) .....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 47 Colocación del espécimen prismático según lo indica el manual de uso del aparato E-METER.(García Romero, 2021).....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 48. Vibración de prismas a varias frecuencias. (García Romero, 2021) .....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 49. Se registra la frecuencia más alta detectada para cada espécimen ensayado (García Romero, 2021).....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 50. TIPO 1. Conos formados en ambos extremos, menores de 25mm de las grietas hasta las tapas.....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 51. . TIPO 2. Conos formados en ambos extremos, menores de 25mm de las grietas hasta las tapas. ....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 52, TIPO 3. Fracturas verticales de columnas de extremo a extremo conos no formados. ....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 53. TIPO 4. Fracturas diagonales sin agrietamiento en los extremos golpear poco con un martillo para distinguirlo de la falla tipo 1. ....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 54. TIPO 5. Fracturas en los lados de la parte superior o inferior (ocurre comúnmente con tapas no adheridas).....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 55. TIPO 6. Similar al tipo 5, pero es puntual en un extremo de los cilindros. ....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 56. Esquema del ensayo de módulo de elasticidad con un micrómetro (NMX-C-128-ONNCCE-2013) .....</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 57. el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándolo antes de aplicar la carga. (Bernabé Reyes).....</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 58. Secuencia de pasos para el desarrollo de las pruebas electroquímicas.....</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 59. Cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% de la solución en masa respecto al agua. (Bernabé Reyes) .....</i>	<i>117</i>



*Ilustración 60. Agua utilizada para la solución del ciclo húmedo para pruebas de corrosión. (García Romero, 2021)..... 117*

*Ilustración 61. Componentes de la media celda cobre-sulfato de cobre (electrodo de referencia) (NMX-C-495-ONNCCE-2015)..... 120*

*Ilustración 62. Especímenes “paleta” de la mezcla SCBA con agregado CCA y una relación a/c=0.45, conformados de acero embebido en concreto, los cuales se utilizaron para medir el potencial de corrosión. (García Romero, 2021) ..... 121*

*Ilustración 63. Circuito de media celda utilizando un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre (NMX-C-495-ONNCCE-2015) ..... 122*

*Ilustración 64. Equipo utilizado para prueba de potencial de corrosión (Bernabé Reyes) ..... 122*

*Ilustración 65. Acomodo de equipo para lectura de potencial de corrosión (García Romero, 2021) .. 122*

*Ilustración 66. Medición de potencial de corrosión. (García Romero, 2021) ..... 123*

*Ilustración 67. Configuración del sistema electroquímico. (ASTM-G59, 2003) ..... 123*

*Ilustración 68. Potenciostato marca Gamry, modelo E600. Software de operación y de análisis versión 6.33. .... 124*

## Índice de Tablas

*Tabla 1. Composición química a cumplir de las cenizas puzolánicas y volantes (ASTM C 618–03)..... 7*

*Tabla 2. Aplicación de los residuos de construcción y Demolición ..... 19*

*Tabla 3. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición. .... 25*

*Tabla 4. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición ..... 27*

*Tabla 5. Requisitos en los ensayos de penetración de agua..... 28*

*Tabla 6. Fuentes de las materias primas usadas y la fabricación del cemento Portland (Kosmatka, Steven, & al., 2004.) ..... 31*

*Tabla 7. Tipos de cementos (NMX-C-111-ONNCCE-2018)..... 31*

*Tabla 8 Clase resistente (NMX-C-111-ONNCCE-2018)..... 32*

*Tabla 9 Características especiales (NMX-C-111-ONNCCE-2018)..... 32*

*Tabla 10 Componentes de los cementos ..... 32*

*Tabla 11. Límites de granulometría para agregado fino (NMX-C-111-ONNCCE-2018) ..... 34*

*Tabla 12. Límites de granulometría del agregado grueso, en masa (NMX-C-111-ONNCCE-2018)..... 35*

*Tabla 13. Propiedades típicas del superplastificante CRISOTAN® R-5 (Christianson, S.A. de C.V.) ..... 41*

*Tabla 14. Ejemplo de dosificación del CRISOTAN R-5 (aditivo fluidificante) en polvo para una mezcla de concreto. (Christianson, S.A. de C.V.) ..... 41*

*Tabla 15. Registro de datos granulométricos de agregados finos. .... 62*



“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”



Tabla 16. Registro de datos de granulometría para agregados gruesos. ....	64
Tabla 17. Colores patrón para tabla de colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE-2019).....	65
Tabla 18.. Resumen de las propiedades de los materiales.....	76
Tabla 19. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción (ACI).....	77
Tabla 20. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado (ACI) .....	78
Tabla 21. (a) Correspondencia entre la relación agua/ cemento y la resistencia a la compresión del concreto.....	79
Tabla 22. (b) Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas .....	79
Tabla 23. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto .....	80
Tabla 24. Cantidades de material a utilizar resultantes del proporcionamiento ACI. ....	81
Tabla 25. Lista de Mezclas elaboradas con descripción de partes. ....	81
Tabla 26. Mezclas testigo. Propiedades .....	83
Tabla 27. Propiedades y Mezclas con 10% de sustitución de Ceniza de horno .....	83
Tabla 28. Propiedades y Mezclas con sustitución al 10% de Ceniza de Bagazo de Caña. ....	83
Tabla 29. Valor nominal del revenimiento y tolerancias. (NMX-C-156-ONNCCE-2020).....	85
Tabla 30. Número de capas requeridas para los especímenes. (NMX-C-159-ONNCCE-2016) .....	87
Tabla 31 Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleadas para moldear los especímenes cilíndricos de ensayo (NMX-C-159-ONNCCE-2016) .....	87
Tabla 33. Resistencia a la compresión y espesor máximo del compuesto para cabeceo. (NMX-C-109-ONNCCE-2013) .....	92
Tabla 34. Tiempos y tolerancias para la toma de lecturas o mediciones (NMX-C-504-ONNCCE-2015) 99	
Tabla 35. Datos de absorción del espécimen “control CCA” con Fluidificante. ....	104
Tabla 36. Resumen de resultados de los cálculos de la prueba de Fagerlund para “Control CCA con fluidificante”. (García Romero, 2021) .....	105
Tabla 37. Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión de Faraday (A).....	129
Tabla 38. Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión de Faraday (B).....	129
Tabla 39. Valor de la densidad del cemento CPC-30R usado en la investigación.....	131
Tabla 40. Especificaciones físicas que deben cumplir los morteros (NMX-C-021-ONNCCE, 2015).....	131
Tabla 41. Resultados de consistencia normal y tiempos de fraguado para las pastas de cemento y cemento con sustitución SCBA 10%.....	132



Tabla 42. Resultados obtenidos de la caracterización de agregados pétreos.....	132
Tabla 43. Límite de granulometría para agregado fino. (NMX-C-111-ONNCCE-2018).....	133
Tabla 44. Resultados de análisis del agua potable en el laboratorio de materiales .....	135
Tabla 45. Riesgo de Corrosión (NMX-C-530-ONNCCE-2018).....	136
Tabla 46. Relación entre $E_{corr}$ y la actividad de corrosión. (NMX-C-495-ONNCCE-2015).....	150
Tabla 47. Clasificación de los valores de $i_{corr}$ en términos de vida útil .....	154

## Índice de gráficos

Gráfico 1. de mezcla “Control CCA con fluidificante” (García Romero, 2021).....	105
Gráfico 2. Rpl obtenida con el software de análisis del potencióstato Gamry.....	125
Gráfico 3. Curva de distribución granulométrica de la arena volcánica. ....	134
Gráfico 4. Curva de distribución granulométrica de la CCA .....	134
Gráfico 5. Curva de distribución granulométrica de RCA .....	135
Gráfico 6. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con sustitución de agregado de concreto reciclado (RCA), relación $a/c=0.45$ . ....	136
Gráfico 7. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con sustitución de agregado de concreto reciclado (RCA), relación $a/c=0.65$ . ....	137
Gráfico 8. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con agregado natural triturado (CCA), relación $a/c=0.45$ . ....	138
Gráfico 9. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con agregado natural triturado (CCA), relación $a/c=0.65$ . ....	139
Gráfico 10. Valores de Frecuencia de resonancia para mezclas de concreto endurecido en Vigas de 6x6x26cm. Probados a edades de 1400 días. ....	140
Gráfico 11. Valores de índice de absorción (I), obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días. ....	141
Gráfico 12. Valores del coeficiente de permeabilidad (K), obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días. ....	142
Gráfico 13. Valores de porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ), expresada en porcentaje, obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días. ....	143
Gráfico 14. Valores de sortividad (S), obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días. ....	144
Gráfico 15. Comparación de resistencia a compresión de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación $a/c=0.45$ . ....	145



Gráfico 16. Comparación de resistencia de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación $a/c=0.65$ .	146
Gráfico 17. Comparación de resistencia de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación $a/c=0.45$ .	147
Gráfico 18. Comparación de resistencia de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación $a/c=0.65$ .	148
Gráfico 19. Curvas esfuerzo deformación de mezclas de concreto con relación $a/c=0.45$	149
Gráfico 20. Curvas esfuerzo-deformación de mezclas de concreto con relación $a/c=0.65$	149
Gráfico 21. Valores de módulos de elasticidad (E) en cilindros de 10cm de diámetro y 20cm de altura.	150
Gráfico 22. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de SCBA, relación $a/c=0.45$ .	151
Gráfico 23. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de SCBA, relación $a/c=0.65$ .	152
Gráfico 24. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de ABMP, relación $a/c=0.45$ .	153
Gráfico 25. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de ABMP, relación $a/c=0.65$ .	154
Gráfico 26. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de SCBA, relación $a/c=0.45$ .	155
Gráfico 27. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución parcial de SCBA, relación $a/c=0.45$	156
Gráfico 28. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de SCBA, relación $a/c=0.65$ .	157
Gráfico 29. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución parcial de SCBA, relación $a/c=0.65$ .	157
Gráfico 30. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de ABMP, relación $a/c=0.45$ .	158
Gráfico 31. Acumulado de densidad de corriente de corrosion en mezclas con sustitución parcial de ABMP, relación $a/c=0.45$ .	158
Gráfico 32. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de ABMP, relación $a/c=0.65$ .	159
Gráfico 33. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución de ABMP, relación $a/c=0.65$ .	159



## Glosario

**Acero.** Aleaciones hierro-carbono, con un contenido máximo de carbono del 2%, aproximadamente. El carbono dota al hierro de destacadas propiedades mecánicas, necesarias para sus aplicaciones industriales. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Agentes agresivos.** Componentes del medio ambiente al que es atribuible la acción corrosiva sobre el material metálico. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Ánodo.** Electrodo de las pilas electroquímicas o electrolíticas en el que se produce la oxidación de alguna sustancia. En los fenómenos de corrosión, que suelen desarrollarse sobre electrodos mixtos, las zonas de mayor tendencia a disolverse, en las que los átomos metálicos se oxidan a cationes:  $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$ . En los ánodos fluye corriente eléctrica positiva hacia el medio electrolítico (transferencia de cationes a la solución o de aniones de la solución o de aniones de la solución al electrodo). (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Acero de refuerzo.** Conjunto de barras de acero que se colocan dentro de los elementos de concreto y hacen que los mismos sean aptos para resistir esfuerzos de tensión originados por flexión, cortante, torsión o carga axial, para incrementar su resistencia. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Cátodo.** Es el electrodo de una pila de corrosión en el que tiene lugar el proceso de reducción. Procesos catódicos típicos de corrosión son la reducción de oxígeno en medios neutros o alcalinos ( $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ ) y la de protones en medios ácidos ( $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$ ). (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Corrosión.** La transformación de un metal del estado elemental al combinarlo (estado iónico) por reacción con el medio ambiente. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Corrosión generalizada.** Es una corrosión de tipo uniforme en toda la superficie del refuerzo que se manifiesta con el adelgazamiento uniforme de



las barras producto de la pérdida regular del metal superficial. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Corrosión localizada.** Se produce cuando las áreas anódicas (de oxidación) y las catódicas (de reducción) están separadas unas de otras dando lugar a la disolución del metal en un área restringida. La corrosión localizada puede ocurrir tanto a escala microscópica como macroscópica. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Delaminación.** Desprendimiento de fragmentos laminados de concreto, a causa de las tensiones generadas por los productos de corrosión del acero o por dilataciones y contracciones diferenciales debido a cambios de temperatura. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Durabilidad.** Es la capacidad de un material de construcción, elemento o estructura de concreto de resistir las acciones físicas, química, biológicas y ambientales vinculadas al efecto de los cambios climáticos con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su condición de servicio y su forma original, así como sus propiedades mecánicas. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Electrodo de referencia.** Una media celda prácticamente impolarizable y de potencial constante, que sirve para medir el potencial del electrodo sometido a estudio en la célula de ensayo, refiriéndolo a una escala arbitraria (p.e., la escala de hidrógeno, de **Cu/CuSO<sub>4</sub>**, de Ag/AgCl, etc.). (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Mapa de Isopotenciales.** Son líneas de Isopotenciales que se dibujan sobre la superficie evaluada con la finalidad de establecer el área de cambio de potencial. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Pasividad.** Se dice que un metal se encuentra en estado pasivo cuando permanece prácticamente inalterado, por largos periodos, en medios en los que debería reaccionar, si se tiene en cuenta su tendencia termodinámica, es



decir, sometidos a potenciales comprendidos entre los de equilibrio del material metálico en el medio y otro superior correspondiente al de reducción del oxígeno, o de cualquier otra sustancia de medio susceptible a reducirse. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Potencial de corrosión.** “Es el potencial de un electrodo que se corroe en un medio dado, sin flujo de corriente externa que lo genere. Para el mismo concepto se emplea también los siguientes términos: potencial de circuito abierto; potencial de corrosión libre; potencial de reposo; potencial de media celda y potencial estacionario. El potencial de corrosión no es un potencial de equilibrio, pues, aunque se da en él un equilibrio eléctrico hay transformación neta de sustancia, con la única condición de que exista equivalencia entre las velocidades globales de oxidación y reducción”. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Potencial electroquímico.** Es el potencial eléctrico de un metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Voltímetro.** Es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico cerrado, pero a la vez abiertos en los polos. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)



## Justificación

### Planteamiento y delimitación del problema.

“En términos simples, el cemento es una estructura mineral creada por el hombre a altas temperaturas que está hecha principalmente de cal, sílice y óxidos de aluminio y hierro”. (Cement Sustainability Initiative CSI, 2012)

La fabricación del cemento necesita temperaturas tan altas como 1400°C, lo requiere una gran cantidad de energía, lo que se traduce a quemar combustibles fósiles, y, por ende, emitir dióxido de carbono, aproximadamente 1 tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cemento. (BBC mundo, 2018)

Los efectos de la industria del cemento, afectan directamente a el cambio climático, las emisiones al agua y al aire, así como la explotación de recursos naturales y de salud, y seguridad de los trabajadores. (Cement Sustainability Initiative CSI, 2012)

La producción ha aumentado más de treinta veces desde 1950 y casi cuatro veces desde 1990.(Rodgers, 2018) En el año 2018, el consumo de dicho material aumentó 1,5%, a pesar de que el pujante mercado chino sufrió una desaceleración, informó la Asociación Mundial de Cemento. Y sigue teniendo una alta demanda.

A diferencia de la industria eléctrica, que ha logrado encontrar alternativas al uso de combustible fósil, para la industria de la construcción, ha sido todo un desafío. Aunque en los últimos años han surgido algunas iniciativas para producir cemento más “verde”, ninguna ha logrado un éxito masivo. Por lo anterior, existe una fuerte presión de parte de gobiernos y organismos internacionales para que la industria consiga volverse más sostenible. (BBC mundo, 2018)

En esta investigación se elaboraron mezclas de concreto con sustitución del 10% de Ceniza de Bagazo de Caña, sustitución del 10% de Ceniza de horno de elaboración de ladrillo y una sustitución del 50% de agregado reciclado



producto de demolición, esto con la intención de reducir el consumo de cemento en las mezclas y de esa forma disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente. Además, se aprovechan distintos residuos como los indicados anteriormente, y así comprobar mediante esta investigación si se mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto. De acuerdo con otras investigaciones, se ha probado que las mezclas de concreto hidráulico con sustituciones de cenizas volantes no solo tienen un menor costo, sino que incorporan una menor huella de carbono y energía, en comparación con las mezclas convencionales. (Yu, K Mishra, Wu, & KY Leung, 2018)

## Objetivos

### Objetivo general

Evaluar la durabilidad de mezclas de concreto hidráulico mediante pruebas no destructivas con diferentes relaciones agua/cemento y diversas adiciones ecológicas, contrastando edades tempranas y tardías.

### Objetivos particulares

- Determinar las características físico-mecánicas del concreto hidráulico mediante diferentes evaluaciones: Resistividad eléctrica, frecuencia de resonancia, Compresión simple, Módulo de Elasticidad estático, densidad, absorción (prueba de Fagerlund).
- Evaluar mediante la técnica de resistencia a la polarización lineal la velocidad de corrosión de las barras de acero en los distintos tipos de mezclas.
- Analizar y comparar los resultados de las diferentes pruebas a edades tardías para las mezclas con sustitución y las mezclas testigo.



## Hipótesis

Las sustituciones ecológicas como las cenizas puzolánicas derivadas del Bagazo de caña (SCBA) y del horno de fabricación de tabique (AMBP), así como el agregado reciclado producto de demolición (RCA) mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto a edades tardías.



## 1. Introducción

El concreto hidráulico es universalmente aceptado por los constructores como uno de los mejores materiales de construcción. "Es asequible, puede producirse en casi cualquier lugar y tiene todas las cualidades estructurales adecuadas para construir un edificio o una infraestructura duradera", explica Félix Preston, subdirector de investigación del Departamento de Energía, Medio Ambiente y Recursos de Chatham House.

Pero, a pesar de su presencia generalizada, las credenciales ambientales del concreto han sido objeto de un mayor análisis en las últimas dos décadas. La producción de cemento Portland, el tipo más común, no solo implica la extracción de piedra en canteras, lo que contamina el aire por la emisión de polvo, sino que también requiere el uso de enormes hornos, que consumen grandes cantidades de energía, así como el proceso químico de fabricación de cemento que emite niveles muy altos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Rodgers, 2018)

En las últimas décadas se ha venido dando cada vez mayor importancia a la durabilidad del concreto hidráulico, ya que el comportamiento que a lo largo de su vida útil han presentado las estructuras diseñadas solo bajo los criterios de resistencia mecánica no ha sido suficientemente adecuado.

Existen varios mecanismos que disminuyen la durabilidad de los elementos elaborados con cemento, y con ello disminuye la vida útil de una estructura, como son algunos contaminantes, aceites, algas, materia orgánica, arcillas, limos, etc. Lo que provoca las reacciones álcali-sílice, reacciones álcali-carbonato y ataques por sulfatos y por cloruros. Una manera de prevenir la acción de estos mecanismos en el cemento, es la utilización de puzolanas como sustitutos parciales del cemento.

Las puzolanas son materiales que al ser agregados al concreto y mortero tienden a mejorar sus características físico-mecánicas y de durabilidad. Asimismo, el uso de los materiales puzolánicos, permite reducir la cantidad de



desechos depositados en el medio ambiente. Por lo tanto, el uso de estos materiales como sustitutos del cemento redundará en un impacto ecológico y favorable al medio ambiente.

“El concreto es el material fabricado por el hombre más utilizado de la historia. Solo el agua lo supera como el recurso más consumido del planeta”, así cita Lucy Rodgers para la BBC. El cemento es el ingrediente clave del concreto, y, aunque ha dado forma a la mayor parte de las construcciones que nos rodean, también deja una gran huella de carbono. (Rodgers, 2018)

La producción de una tonelada de Cemento Portland (CP) genera aproximadamente entre 0.67 y 1.0 tonelada de CO<sub>2</sub>, según el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007). Tan solo el año 2012 la industria del cemento fue responsable de cerca del 5% del total de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generadas por el hombre. (Cement Sustainability Initiative CSI, 2012), mientras que para el año 2018 fue la fuente de alrededor del 8% de las emisiones del CO<sub>2</sub>, según el centro de estudios británico Chatham House. La industria del cemento es el tercer mayor emisor de CO<sub>2</sub> en el mundo, tan solo después de países como China y Estados Unidos de América. (Rodgers, 2018)

En el año 2012, en México se produjeron más de 10 millones de toneladas de cemento (FICEM, 2013) y para el año 2016 su producción incrementó a 40.6 millones de toneladas de acuerdo con los datos de la Cámara del Cemento (CANACEM) lo que equivale a 40.6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> que se liberaron al medio ambiente, además de que se tuvo un consumo nacional de 40.1 millones de toneladas. (CANACEM, 2016)

Es por ello que en este trabajo se propone el empleo de sustituciones ecológicas del cemento en la elaboración de mezclas de concreto, evaluando la durabilidad del mismo con pruebas no destructivas y comparando los resultados obtenidos a edades tempranas con los de edades tardías.



## 1.1. Revisión del Estado del Arte

El deterioro de las estructuras de concreto reforzado ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción en los últimos años. Los principales agentes agresores como cloruros, sulfatos y carbonatación penetran a través de la red de poros interconectados provocando daños directamente al concreto, principalmente la corrosión del acero de refuerzo, la cual está estrechamente ligada al agrietamiento y desprendimiento del concreto armado, provocando una disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero y por ende disminución de la vida útil.

Hoy en día, el material de construcción que predomina es el cemento portland. De acuerdo con la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM) en México, en el 2016, la producción de cemento fue de 40.6 millones de toneladas equivalente a 40.6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> que se liberaron al medio ambiente, y un consumo nacional de 40.1 millones de toneladas. (CANACEM, 2016)

Un elevado porcentaje de las manifestaciones patológicas tiene origen en las etapas de planeamiento y proyecto. Las fallas de planeamiento y proyecto son en general más graves que las fallas de calidad de los materiales o de mala ejecución. Es siempre preferible invertir más tiempo en el detallado del diseño de la estructura, que, por falta de previsión, tomar decisiones apresuradas y adaptadas durante la ejecución.

Lo anterior ha despertado la preocupación e interés de las industrias y academias para generar alternativas y tecnologías de construcción de materiales con criterios de sostenibilidad. Para esto, es necesario promover el uso de los recursos cementicos alternativos, ya sea naturales o como subproductos de actividades industriales. Una forma de mitigar las consecuencias es implementando adiciones ecológicas al concreto armado.

Las adiciones ecológicas están compuestas principalmente de puzolanas. Hoy en día estos materiales alumino-silíceos son considerados como



ecomateriales. Estas puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto. (Roland Stulz, 1997) Estas adiciones ecológicas son residuos que resultan de la quema de materia orgánica, la cual al adicionarla al concreto permite densificar la matriz. (Leung, Yu, & Mishra, 2017)

Sustituir cemento con ceniza volante en el diseño de mezcla de concreto ha demostrado varios beneficios:

1. El reemplazo de cemento por ceniza volante incrementa el “cuidado ambiental” y disminuye el calor de hidratación, así como el costo del material.
2. La adición de ceniza volante puede mejorar la durabilidad y reduce la contracción por secado.
3. La morfología y micro agregados por efecto de partículas de ceniza volante ofrecen mejor trabajabilidad, mayor compactación en la zona de transición interfacial y una estructura de poro más fina en el sistema. (Leung, Yu, & Mishra, 2017)

Por otro lado, y considerando la urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es evidente la necesidad de desarrollar materiales cementosos alternativos, que reduzcan el impacto medio ambiental de las actividades de construcción con cemento portland. Entre las diversas rutas posibles, está el desarrollo de cementos compuestos (Malhotra & Mehta, 1996.) con la sustitución parcial del cemento con aditivos minerales como son las escorias metalúrgicas, la ceniza volante, el metacaolín, etc. Estos tipos de cementos son considerados ya por las normas o estándares en diversos países, no obstante, hay muchos aspectos que requieren investigación para incrementar las posibilidades de utilización de dichos cementos.

Durante el proceso de manufacturación (seco o húmedo) del cemento, la industria cementera incorpora materiales suplementarios y/o alternativos de origen: industrial, agrícola, natural o materia prima calcinada para la



manufacturación del cemento Pórtland denominándolas “puzolanas” por el alto contenido silico-aluminoso que reaccionan químicamente con la portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Martínez-Reyes, Alavez-Ramírez, Montes-García, & Jiménez-Quero, 2010), dichas puzolanas se utilizaban desde la antigua Roma hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX y eran utilizadas como materiales cementantes (UCLM, 2013)

El código ASTM (1992), en la definición 618-93 específica a las puzolanas como «materiales silíceos o aluminosilíceos que por si solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes».

Con la intención de proveer durabilidad al concreto y mortero reforzado, ya sea mejorando sus propiedades mecánicas, estructurales, físicas o químicas, en diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas, de las cuales destacan: cenizas volantes, cenizas de alto horno, cenizas de bagazo de caña, CCA, entre otras. (Marquez-Montero & al, 2010.)

### ***1.1.1. Clasificación de las puzolanas***

Las puzolanas se pueden clasificar según su origen en, puzolanas naturales y puzolanas artificiales (cenizas); estas últimas pueden ser subproductos de algún proceso industrial o agroindustrial.

La norma ASTM C-618 da una clasificación para estos dos grupos de puzolanas, dicha clasificación toma en cuenta varios factores. Tales como, origen y composición química; las cuales se muestran en seguida:



### 1.1.1.1. Definición de ceniza volante:

La ceniza volante es el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de la planta o el carbón en polvo y que es transportado por los gases de combustión.

**Nota:** Esta definición de las cenizas volantes no incluye, entre otras cosas, el residuo resultante a partir de la quema de basura municipal o cualquier otro tipo de basura con el carbón; la inyección de cal directamente en la caldera para la eliminación de azufre; o la quema de basura industrial o municipal en incineradores comúnmente conocidas como cenizas de incineración.

#### Clasificación

**Clase N:** Puzolanas naturales en bruto o calcinadas, que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como dados en este documento, como algunas tierras de diatomeas; shaeds opalina y lutitas, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas.

**Clase F:** Cenizas volantes que normalmente se producen por la quema de la antracita o carbón bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables de esta clasificación. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

**Clase C:** Cenizas volantes que normalmente se producen a partir del lignito y carbón sub-bituminoso que cumpla con los requisitos aplicables a esta clasificación. Esta clase de las cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

#### Composición química

Las cenizas volantes y puzolanas naturales deben cumplir con los requisitos sobre la composición química prescrito en la tabla siguiente (ASTM C 618–03):



Tabla 1. Composición química a cumplir de las cenizas puzolánicas y volantes (ASTM C 618-03)

Requerimientos Químicos			
Compuesto	Tipo de Puzolana		
	N	F	C
SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % min.	70	70	50
SO <sub>3</sub> % máx.	4	5	5
Contenido de Humedad % máx.	3	3	3
PPI % máx.	10	6*	6

### 1.1.1.2. Tipos y usos de puzolanas

En “Advanced Concrete Technology Constituent Materials del 2004 describen las aportaciones de los principales materiales puzolánicos que se usan de forma común en la fabricación de concreto y mortero, dichos materiales son: Ceniza volante, Escoria granulada de alto horno, Humo de sílice y puzolanas naturales (dentro de éstas de las más usadas son el Metacaolín y la piedra caliza). (Newman & Choo, 2003)

Aunque al día de hoy existen otros materiales que también han sido muy estudiados, tales como la ceniza de bagazo de caña y la ceniza de cascarilla de arroz, (Marquez-Montero & al, 2010.; Águila & Soso, 2008; Hernández Toledo, 2010)[1,2,16] estos materiales podrían clasificarse dentro de las puzolanas artificiales de origen agrícola o agroindustrial.

#### Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad y es el material cementante suplementario más utilizado en los Estados Unidos. Bajo la ignición (combustión) en el horno, la mayor parte de la materia volátil y el carbono del carbón se queman. Durante la combustión, las impurezas minerales del carbón (tales como arcilla, feldespatos, cuarzo y esquisto) se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica como pequeñas esferas vítreas llamadas cenizas volantes. Luego, se colecta la ceniza volante de los gases de escape a través de precipitadores electrostáticos o de filtros de



manga. La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores.

Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1  $\mu\text{m}$  (micrómetro) hasta más de 100  $\mu\text{m}$ , siendo que el tamaño de una partícula típica es de 20  $\mu\text{m}$ . Sólo el 10% al 30% de la masa de las partículas es mayor que 45  $\mu\text{m}$ . El área superficial es normalmente de 300 a 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ , a pesar de que algunas cenizas pueden tener área superficial tan baja como 200  $\text{m}^2/\text{kg}$  o tan alta como 700  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La masa específica relativa de la ceniza volante normalmente varía de 1.9 a 2.8 y el color es generalmente gris o marrón.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de la ASTM C 618 (AASHTO M 295) se emplean comúnmente como aditivos (adiciones) puzolánicos en concretos de uso universal. Los materiales de Clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO) y contenido de carbono menor que 5%, pero algunas pueden contener hasta 10%. Los materiales de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10% al 30% de CaO) y contenido de carbono menor que 2%. Muchas de las cenizas volantes de la Clase C cuando se exponen al agua, se hidratan y se endurecen en menos de 45 minutos. Algunas cenizas volantes se encuadran en ambas Clases F y C (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

### **Escoria granulada de alto horno**



Escoria de alto horno es un subproducto de la producción de arrabio, una etapa en la producción de acero, aproximadamente 300 kg de escoria se generan por cada tonelada de arrabio (Neville, 1997)

Se produjeron en todo el mundo más de 167 millones de toneladas de escoria en 1996 (Bensted & Barnes, 2002). Se estima que alrededor de 1,4 millones son producidos anualmente por las dos mayores empresas siderúrgicas. (Escalante-García, Espinoza-Pérez, Gorokhovsky, & Gómez-Zamorano, 2009)

Este producto se desarrolla en el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura de cerca de 1500°C se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo. El material granulado, el cual es molido hasta menos de 45  $\mu\text{m}$ , tiene un área superficial Blaine de 400 a 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . La masa específica relativa para la escoria granulada de alto horno molida es de 2.85 a 2.95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

La composición química de la escoria varía ampliamente entre plantas debido a las diferencias en las materias primas empleadas (Bensted & Barnes, 2002). Se han propuesto diversos índices, para intentar predecir la calidad de las escorias aceptables, un ejemplo es el índice  $I_h = (C + 1,4 M + 0,56 A) / S > 1,65$ . (Daube & Bakker, 1986)

La escoria granulada es áspera y tiene forma angular. En presencia del agua y de un activador, NaOH o CaOH, ambos suministrados por el cemento Portland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento Portland. Sin embargo, las escorias enfriadas por el aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por el agua (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

BFS (Blast Furence slag) se pueden utilizar para reemplazar parcialmente CPO (cemento Portland ordinario), o como un material cementoso en sí después de la activación química. Muchas investigaciones se han desarrollado



en las dos áreas, sin embargo, los estudios comparativos de ambas vías en uno BFS no son comunes. Varios factores influyen en la reactividad de BFS, entre ellos están: la superficie, la composición química, la fracción vítrea, etc.

Los concretos basados en escoria activada son de menor impacto ambiental, ya que la escoria no requiere tratamiento térmico y no hay descarbonatación de  $\text{CaCO}_3$  como en el cemento Portland. La escoria es más resistente a la molienda que el cemento Portland, un tamaño de partícula más grueso contribuye a reducir los costos también. (Escalante, y otros, 2001)

La escoria granulada de alto horno fue desarrollada en Alemania en 1853 (Malhotra 1996) y se ha usado desde el inicio del siglo XX (Abrams 1925). La escoria granulada de alto horno molida, cuando es empleada en los concretos para uso general en los Estados Unidos, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la mezcla (PCA 2000), pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria. La ASTM C 989 (AASHTO M 302) clasifica la escoria por su nivel creciente de reactividad como grado 80, 100 o 120. La ASTM C 1073 presenta un método para la determinación de la actividad hidráulica de la escoria granulada de alto horno molida y el ACI 233 (1995) presenta una amplia discusión sobre las escorias. (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

### **Humo de sílice**

El humo de sílice, también llamado de microsílíce, humo de sílice condensado o sílice activa, es un subproducto que se usa como una puzolana. Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C. Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta en bolsas de tela enormes. El humo de sílice condensado se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas.



El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en una forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0.1  $\mu\text{m}$ , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento.

El área superficial del humo de sílice condensado es aproximadamente 20,000  $\text{m}^2/\text{kg}$  (método de la adsorción de nitrógeno). Los cementos ASTM tipos I y III tienen un área superficial de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  y de 500 a 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ , respectivamente. La masa específica relativa del humo de sílice es generalmente de 2.20 a 2.5, mientras que la masa específica relativa del cemento portland es cerca de 3.15. La masa unitaria del humo de sílice varía de 130 a 430  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5% al 10% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto. (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

### **Puzolanas naturales**

Puzolanas naturales son materiales vítreos amorfos, que normalmente se clasifican en cuatro grupos:

1. **Materiales volcánicos** - estos son ricos en vidrio en estado natural o parcialmente alterada. Se encuentran en todo el mundo en las regiones volcánicas. Son el resultado de la explosión de magma que se enfrió rápidamente por ser inactivada para formar vidrio microporoso. A menudo, estos materiales se componen de > 50 por ciento de sílice, seguido de alúmina, óxidos de hierro y cal. A menudo tienen un alto contenido de álcali de hasta 10 por ciento.



2. **Tobas** - donde un vidrio volcánico se ha transformado en parte o totalmente en compuestos zeolíticos debido a la intemperie. La gama de la composición química es similar a los materiales volcánicos. La pérdida por ignición es una indicación del grado de transformación que se ha producido debido a la intemperie.
3. **Sedimentaria** - estos son ricos en diatomeas opalina. Las diatomeas son los esqueletos de los organismos que se componen principalmente de ópalo. Ellos tienen alto contenido de sílice, sin embargo, estos materiales están a menudo contaminados con arcilla.
4. **Diagenética** - Estos son ricos en sílice amorfa y derivados de la erosión de las rocas silíceas. Ellos son normalmente altos en sílice y bajos en otros óxidos, dependiendo de la composición mineral de la roca madre.

Con todos los materiales puzolánicos, la forma y la gradación de partículas tendrá un efecto significativo en la necesidad de agua del hormigón. Puzolanas de origen natural suelen tener forma irregular, que aumentará la demanda de agua a menos que se utilizan plastificantes para compensar (Newman & Choo, 2003)

Otro grupo de materiales puzolánicos naturales, que son los más comúnmente empleados hoy en día, son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperaturas en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

Los materiales arcillosos con un alto porcentaje de cuarzo y feldespatos, minerales que son altamente cristalinos y no reactivos a la cal. Son materiales que al ser empleados como puzolanas reaccionan pobremente en estado natural e incrementan su reactividad cuando es inducida una activación térmica debido a la modificación de la estructura cristalina además dichos materiales interaccionan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formando un gel C-S-H secundario y



estratlingita (C2ASH8). (Martínez-Reyes, Alavez-Ramírez, Montes-García, & Jiménez-Quero, 2010)

Las arcillas calcinadas se emplean en construcciones en concreto para uso universal, de la misma manera que las otras puzolanas. Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15% y 35% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfato, controlar la reactividad álcali-agregado y reducir la permeabilidad. Su masa específica relativa es de 2.40 a 2.61 y su finura Blaine es de 650 m<sup>2</sup>/kg a 1350 m<sup>2</sup>/kg. El esquisto calcinado puede contener del 5% al 10% de calcio, resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, el esquisto calcinado tiene una pérdida por ignición del 1% al 5%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante.

La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolín de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a 2 micrómetros. La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesite baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mucho más como un aditivo (adición) al concreto que como un sustituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10% de la masa del cemento. Las puzolanas naturales se clasifican por la ASTM C 618 (AASHTO M 295) como puzolana Clase N. (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

Las propiedades desarrolladas en morteros al incorporar materiales puzolánicos arcillosos dependen de la cantidad además de las características de los componentes, del medio de activación o del uso de agentes alcalinos aunado al tiempo de exposición del tratamiento térmico con el objeto de obtener un material cementicio cuya estructura puede ser amorfa o cristalina



resultante de la reacción de hidratación además de la influencia en la zona de interface y en el desarrollo de una matriz homogénea. Estos materiales presentan una combinación de propiedades similares a materiales cerámicos (dureza y resistencia a alta temperatura) y cementicos (pastas y ligantes). (Zhang, Gong, & Lu, 2004; Cioffi R., 2003; Lee & J.S.J., 2002)

Otro material con potencial puzolánico es el residuo de la producción de energía eléctrica mediante la extracción de calor del subsuelo, en las plantas geotérmicas a base de salmuera. La práctica de esta tecnología se ha incrementado considerablemente en años recientes, debido a que es una fuente de energía limpia, generalmente renovable, y de menor costo relativo a otras formas de generación de energía. (E.U. Patente nº 4900360, 1990)

Dicho desecho, denominado Desecho Geotérmico (DG), es obtenido de la mezcla de salmuera y vapor (presurizados naturalmente), que pasa a través de diferentes etapas de extracción de calor. Conforme la temperatura se reduce (inicialmente ~200 °C), de la mezcla se precipita sílice amorfa de tamaño nanométrico, junto con cloruros de sodio y potasio. El precipitado causa serios problemas ya que se deposita en las tuberías como una cascarilla que crece varias pulgadas por mes y debe ser removida periódicamente. (Diaz & Rincon, 1990) Además de estas incrustaciones, una fracción de salmuera remanente se reinyecta al subsuelo y el resto se deposita en lagunas de evaporación que contienen miles de toneladas de este DG. La planta geotérmica de Cerro Prieto en Baja California, México, genera aproximadamente 50.000 toneladas anuales de este DG, el cual no tiene hoy una aplicación. En base a esto, el objetivo de este trabajo fue el de estudiar al DG como reemplazo del CPO lo cual puede presentar una solución al gran problema ecológico que representa actualmente. (Gomez-Zamorano, 2004)

En varias investigaciones se ha determinado que el DG acelera la hidratación del cemento portland, el aumento de la reactividad de la alita y belita, y que posiblemente, las partículas del DG sirven como sitios de nucleación. Estos



factores dieron lugar a la mejora de la resistencia a la compresión durante el período de tiempo de las pruebas (90 días). (Gomez-Zamorano, 2004) (Gómez-Zamorano & Escalante, 2009)

Por otro lado, se tiene la opción de sustituir ahora los agregados pétreos naturales por otros materiales que nos brinden la opción de mejorar algunas propiedades del concreto hidráulico, como por ejemplo materiales pétreos reciclados.

La necesidad de estudiar el comportamiento de materiales pétreos reciclados surge de la crisis posguerra en Europa para reconstruir en los años 40's en el siglo XX, pues se tenían grandes cantidades de escombros como resultado de los bombardeos, estos escombros comenzaron a usarse como canteras para reconstruir obteniendo buenos resultados. Los países más devastados fueron el Reino Unido y Alemania, las publicaciones de la época, mayormente británicas, alemanas y rusas dan cuenta del uso de escombros para construcción de nuevas obras civiles, sólo que mucho de los escombros eran materiales cerámicos (ladrillos, cerámicas de mobiliario de servicios sanitarios), material pétreo natural, plásticos y gomas, (Hoffmann & S. Schubert, 2012) y concreto hidráulico; que posteriormente tuvieron adiciones como: escorias, cenizas, humo de sílice. A fines del siglo XX los EEUU iniciaron también sus estudios en concreto reciclado. El primer informe de concreto reciclado fue realizado en la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, Por Gluzhge, P. en 1946, poco tiempo después de la 2ª Guerra Mundial. (Martinez-Molina, y otros, 2015) Tiempo después en España, el profesor Enric Vázquez (UPC; Barcelona), investigador principal del proyecto, es el primero en abordar el estudio de hormigones reciclados en la década de los '80, que se impulsa con más decisión en los '90 y con gran fuerza a partir del siglo XXI. En España, no obstante, se investiga fundamentalmente el árido procedente del residuo de hormigón: los proyectos FEDER del año 1998 abren la reciente explosión de estudios, proyectos y trabajos, que quizá cristalizan definitivamente con el proyecto RECNHOR del



Ministerio de Medio Ambiente (principios de siglo) y con el grupo de trabajo a él vinculado que desarrolla el Anejo de Hormigón reciclado de la EHE-08. (Gear)

En México se ha tenido un interés mediano en la utilización del método de reciclaje de materiales para disminuir el impacto de la construcción en el medio ambiente. La existencia de una única planta para reciclado de concretos en todo el país no es insuficiente para la cantidad de residuos de la construcción que se generan.

En la ciudad de México se generan 7 mil toneladas diarias de RCD de los cuales menos del 10% se recicló y a su vez solo 10% de los agregados resultantes del proceso de reciclado se utilizaron en obras de ingeniería. (Concretos reciclados y eficiencia energética, 2014)

### **Concreto reciclado**

La diferencia más sobresaliente entre un concreto reciclado y un concreto convencional es la procedencia del agregado y los porcentajes de sustitución que se deben usar. También hay diferencia en el comportamiento mecánico del concreto debido a las interacciones que se hacen entre el agregado reciclado y la matriz cementante.

### **Agregados de concreto reciclado**

De una manera muy general se tiene la clasificación de los residuos de construcción y demolición de la siguiente manera (de Brito & Nabajyoti, 2013)

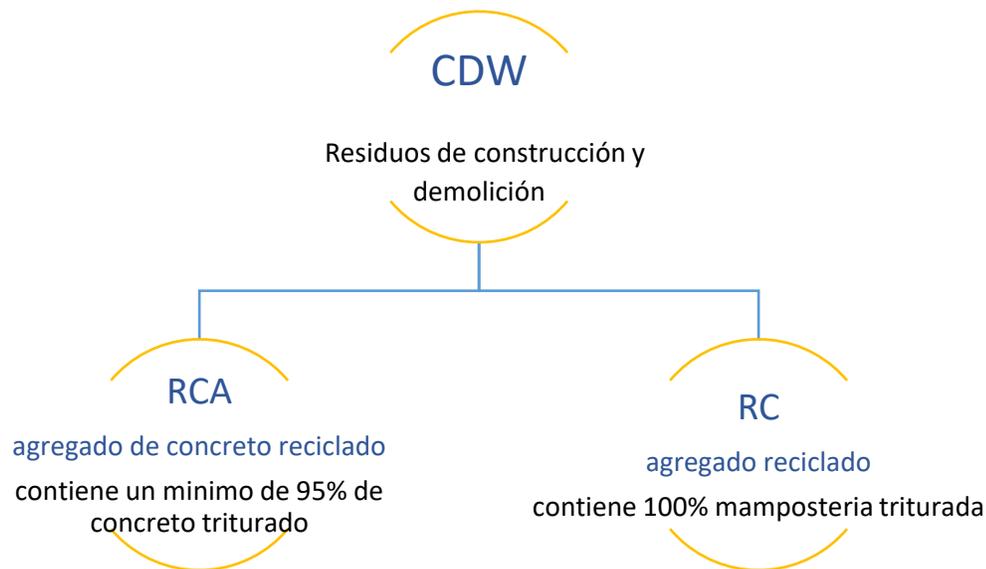


Ilustración 1. Clasificación de los RA

De acuerdo con las recomendaciones del RILEM, el agregado grueso reciclado se puede clasificar en tres categorías en función de su composición:

- **Tipo 1:** Agregado procedente de su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo
- **Tipo 2:** Agregados procedentes de escombros de concreto
- **Tipo 3:** Agregados compuestos por una mezcla de pétreos naturales (mayor a 80%) y agregado de fábrica de ladrillo (inferior a 10%) o en su defecto agregado de concreto hasta un 20%.

En la mayoría de los países de la unión europea se suele usar 4 tipos de agregados reciclados:

- **Agregado de Plantas de Tratamiento.** Pueden distinguirse de los agregados procedentes del concreto, ya que éstos tienen propiedades específicas de elaboración.
- **Agregados reciclados cerámicos.** Se obtiene en el procesamiento del material predominantemente cerámico. El 85% de este agregado debe tener una densidad seca superior de  $1600 \text{ kg/m}^3$  según la norma holandesa, para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros.



- **Agregados reciclados mixtos.** Deberá contener un porcentaje mayor del 50% de concreto con una densidad seca superior a  $2100 \text{ kg/m}^3$  y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el concreto, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de  $1600 \text{ kg/m}^3$ .
- **Agregado reciclado de concreto.** Es el único tipo de agregado que es admisible para concretos estructurales. Tiene valores límite para las impurezas que puedan tener efectos negativos sobre la resistencia y la durabilidad, un contenido mínimo del 80% de concreto y posee una densidad superior a  $2100 \text{ kg/m}^3$ .

Depende de la procedencia del material se le da o no tratamiento. Los residuos (CDW) se tratan porque quizá puedan contener componentes perjudiciales o su elaboración fue de mala calidad. Conocer la caracterización del residuo antes de usar es necesario y los materiales de residuo pueden ser mezclados con otro material que aporten beneficios a sus características. (de Brito & Nabajyoti, 2013)

### **Sustitución del agregado pétreo natural por el agregado reciclado.**

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizado a nivel mundial debido a sus sollicitaciones mecánicas y versatilidad; sin embargo, no es un material amigable con el medio ambiente debido a la explotación de bancos de materiales existentes en el país y a la producción de su componente principal, el cemento Portland (CP), se emiten grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera (629kg por tonelada de producción), lo cual es preocupante ya que éste último es uno de los gases de efecto invernadero.

Al conocer el porcentaje que ocupa el material pétreo en una mezcla de concreto resulta conveniente realizar una sustitución de 30%-50% (Lauch, Vrijders, & Dooms, 2018) del material pétreo natural por reciclado. Los beneficios de la sustitución tienen efecto en el ámbito ambiental (reducción en la explotación de bancos de material, manejo adecuado de los residuos de



construcción y demolición, reducción de focos de contaminación en las ciudades) pero también en los costos de elaboración de una obra.

La naturaleza de estos residuos de construcción y demolición depende del tipo de obra o infraestructura de la que se obtienen, del tipo y calidad de material utilizado en ellas, y en parte también del tipo de demolición aplicado.

El agregado de concreto reciclado puede implementarse en los siguientes casos.

Tabla 2. Aplicación de los residuos de construcción y Demolición

Residuo	Material Reciclado	Aplicación
Escombros Mezclados de Concretos y Morteros	Agregado Reciclado	Bases Hidráulicas en caminos y estacionamientos. Concretos Hidráulicos.
Escombros mezclados	Material Firme	Terraplenes
Escombros mezclados	Arena Reciclada	Cobertura en Rellenos, Sustituto de Tepetate. Fabricación de Blocks, Tabiques, Adoquinos, Losetas, Postes, Bordillos, Guarniciones.
Escombros Mezclados	Agregados Finos	Andadores y Ciclos
Escombros Mezclados	Agregados Reciclados	Camas de Tuberías, Acostillamiento y Relleno. Relleno de cimentaciones. Pedraplenes. Rellenos de azoteas y jardineras. Conformación de terrenos.
Residuo de concreto	Grava y arena reciclada	Guarniciones y banquetas. Firmes de concreto. Construcción de muros.

### Beneficios económicos al usar agregados reciclados

Para un desarrollo sustentable es importante tener en cuenta los 3 criterios que necesitan estar en equilibrio: Ambiente, sociedad y economía; con estos criterios debemos desarrollar nuestras investigaciones. El beneficio económico en el uso de los agregados reciclados está en diferentes etapas de los procesos constructivos como un ejemplo tenemos el traslado de materiales. Frecuentemente los RCD's se encuentran en la zona urbana o cerca de ellas mientras que los materiales naturales se obtienen de canteras alejadas de la urbe, debido a esta lejanía se incrementan los precios en



traslados. He aquí la ventaja económica de usar RCD's que cumplan con las características para las obras.

Para la evaluación económica de los agregados reciclados la operación inicial sería la adquisición de equipos, conocer todos los costos de mantenimiento y laborales. Los costos operativos se determinarán en función de la energía consumida por el equipo, que depende en gran medida de su potencia nominal y del combustible utilizado. Los costos laborales incluyen administración, supervisión local, operadores de equipos y trabajadores no especializados

Costo estimado de gestión de residuos:

En investigaciones recientes se ha establecido que es de particular beneficio para los contratistas cuando se identifican y resaltan todos los componentes de costos asociados con la producción de desechos. Esto será efectivo para mejorar los procedimientos de control de costos internos para el contratista y ayudar a garantizar que se eliminen los costos improductivos y fácilmente evitables de la gestión de residuos de C&D. Los detalles de dichos costos permiten determinar el costo real de las actividades de gestión de residuos dentro del proyecto. (Best Practice Guidelines on the Preparation of Waste Management Plans for Construction & Demolition Projects., 2006)

Los costos deben cubrir los siguientes aspectos

- Costo de compra de materiales de desecho
- Costo de manejo
- Costo de almacenamiento y transporte
- Ingresos generados por ventas
- Costos de disposición, incluido el impuesto al vertedero

Con los aspectos anteriores será posible estimar:

- Costo total de la gestión de residuos de concreto
- Costo total de manejo de residuos de suelos



- Costo total de gestión de residuos de mampostería

En el caso de un análisis de costos beneficios para el reciclaje de concreto los siguientes procesos son los indispensables y más comunes a tomar en cuenta para obtener un buen análisis.

#### Residuos de la construcción

- cargo por vertido de plantas de reciclaje
- cargo por vertido de vertedero
- transporte
- la contaminación del aire
- emisión de gases
- consumo de energía
- contaminación acústica

Decapado es la etapa donde las rocas se limpian y nivelan. Se requiere equipo como excavadora. Costo incurrido en esta etapa, incluido el costo laboral, el costo del combustible y los gastos generales fijos.

- Equipo
- Labor
- Combustible
- Gastos fijos

Explotación es el proceso en el que se utilizan equipos para la explotación del material y se calculan los siguientes costos:

- Capital
- Capital de trabajo
- Mantenimiento de equipo
- labor
- combustible
- gastos fijos



- almacenamiento

El almacenamiento es la etapa en la que participa una mano de obra.

- capital
- capital de trabajo
- Mantenimiento de equipo
- labor
- combustible
- gastos fijos

**Proceso de trituración.** El proceso de trituración incluye trituración primaria, separación magnética y proceso de trituración secundaria. Se trata de equipos como la trituradora primaria, la trituradora secundaria y el moldeador. Además, se estima el costo de capital, el costo del equipo, el costo del capital de trabajo (aproximadamente el 15% del costo operativo variable), el costo operativo que incluye el costo de mantenimiento del equipo, el costo de la mano de obra, el costo del combustible y el costo indirecto fijo. En este proceso, el único beneficio es el costo de mantenimiento que se puede ahorrar en comparación con el proceso de reciclaje porque hay más desgaste de las cuchillas del equipo. Por lo tanto, la diferencia entre el costo de mantenimiento del equipo para el método actual y el método de reciclaje de concreto es el beneficio obtenido en esta etapa. El proceso de lavado, cribado o secado al aire es la etapa que involucra combustible y agua reciclada para asentar el polvo y todas las partículas.

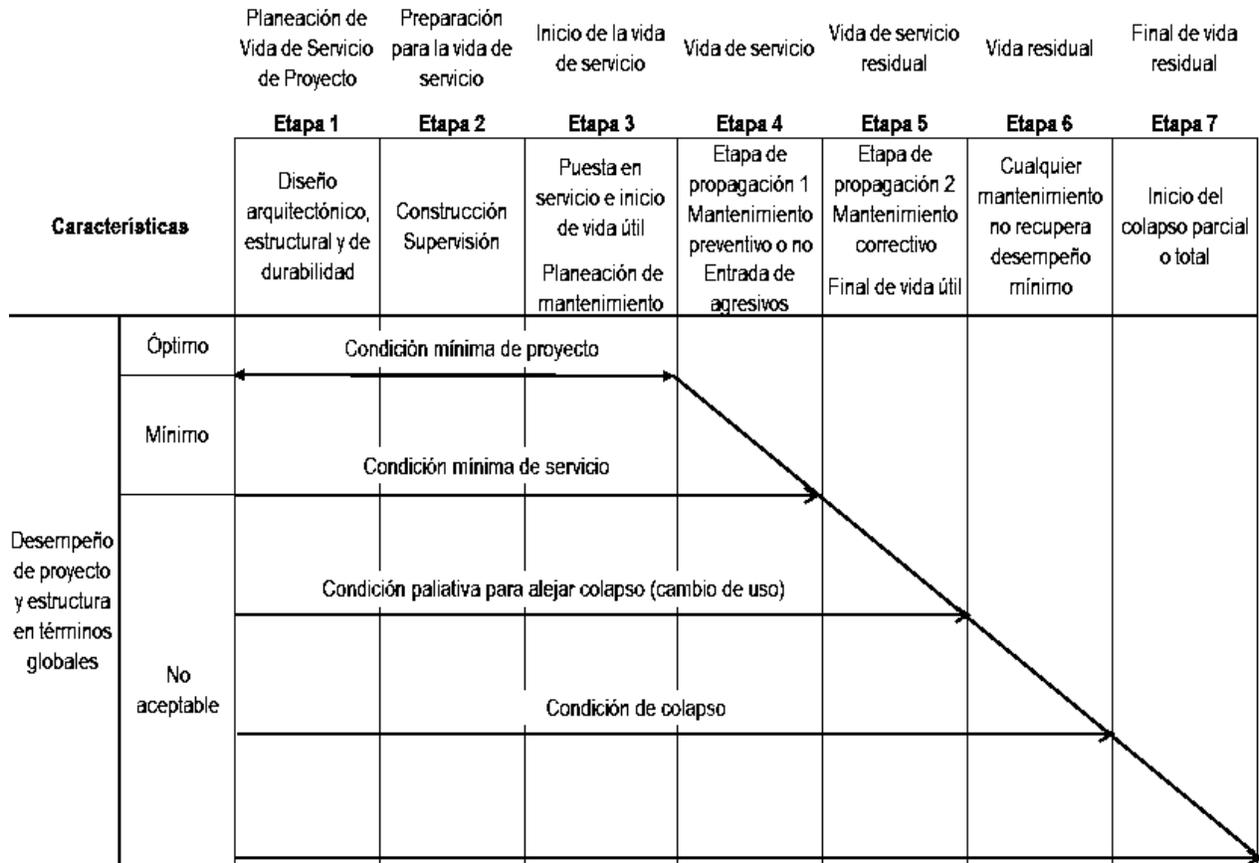
De acuerdo con la investigación realizada por (Vivian, 2008)(el método de reciclaje de concreto puede resultar en una gran suma de ahorro. Los beneficios obtenidos del método de reciclaje de concreto pueden equilibrar el costo gastado para la práctica actual. Por lo tanto, reciclar los desechos de concreto para la nueva producción es un método rentable que también ayuda a proteger el medio ambiente y logra la sostenibilidad de la construcción.



## 2. Materiales

### 2.1. Durabilidad de estructuras de concreto reforzado

De acuerdo con la definición de vida de servicio, su modelo conceptual consta de 7 etapas, presentando una división de acuerdo con la planificación de proyectos y predicciones de durabilidad durante su uso (NMX-C-530-ONNCCE-2018)



#### 2.1.1. Etapa 1. Planeación de vida de servicio de proyecto

Ilustración 2. Modelo conceptual de 7 etapas

#### (arquitectónico, estructural y de durabilidad)

##### 2.1.1.1. Generalidades.

Esta es la etapa más importante de la vida de servicio, pues es donde se establecen todos los criterios y especificaciones para alcanzar los objetivos para los que fue diseñada la estructura. (NMX-C-530-ONNCCE-2018)



1. **Diseño arquitectónico.** Incluye formas y materiales, tipo de ambiente de exposición, tiempo de vida de servicio (etapa 4). (NMX-C-530-ONNCCE-2018)
2. **Diseño por durabilidad.** Con base en códigos y reglamentos, tomar en cuenta ambiente de exposición (agresividad química del medio y del suelo, atmósfera de exposición (HR y T), etc.), materiales a emplear para cumplir vida de servicio. (NMX-C-530-ONNCCE-2018)
3. **Diseño estructural.** “Una vez diseñado el concreto a utilizarse en la estructura para resistir la exposición ambiental, se diseña la estructura por cargas mecánicas dinámicas, tomando en cuenta las características del concreto, principalmente la relación  $a/c$ , para determinar la resistencia mecánica que el concreto diseñado con criterios de durabilidad, alcance cuando endurezca. Aquí intervienen las técnicas de diseño estructural. La vida de servicio debe abarcar hasta la etapa 4. Durante la Etapa 1 deben tomarse acciones para las etapas subsecuentes. Deben ser definidos parámetros tales como recubrimiento de concreto para el acero de refuerzo, tipos de aceros, calidad y desempeño del concreto, etc., que influyan en la durabilidad de la estructura.” (NMX-C-530-ONNCCE-2018)
4. **Diseño del plan de mantenimiento.** “Esta parte es esencial para el proyecto pues es la que permite asegurar que las condiciones establecidas de vida de servicio (arquitectónica, estructural y durable) se cumplan. Es importante incluir la planeación del mantenimiento cuando las estructuras se encuentran en la Etapa 3. Se deben especificar en detalle aspectos como verificación periódica de daños (sea cual fuera su origen). Interacción entre los elementos e instalaciones de la misma estructura, mantenimiento periódico con pinturas, sustituciones de piezas, funcionamiento de drenajes y manejo general de aguas, etc. Deben incluirse también esquemas y formatos para llevar a cabo exitosamente el plan de mantenimiento, así como un



entrenamiento periódico a los responsables de esta parte.” (NMX-C-530-ONNCCE-2018)

### 2.1.1.2. Clasificación según el ambiente agresivo de exposición.

Consiste en clasificar los distintos tipos de ambientes correspondientes a condiciones climáticas extremas. Los especialistas responsables en arquitectura, estructuras y durabilidad, así como el constructor deben tomar en cuenta estas condiciones para establecer las recomendaciones y especificaciones de la estructura de concreto.

Tabla 3. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				
Clase (ambiente de exposición)	Subclase (Condición de exposición)	Tipo de proceso	Designación (Clasificación)	Descripción
No agresivo	Seco	Ninguno	C0	Concreto en ambiente seco o protegido de la humedad y no sometido a condensaciones. Con una humedad relativa <40%
Marina	Sumergida	Corrosión por cloruros	M1	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar.
	zonas aéreas con distancias de 50m a 500m a la línea de la costa.		M2	Elementos exteriores de estructuras en las proximidades de la línea de costa (de 50m a 500m).
	Zonas aéreas con distancias de 0 a 50m		M3	Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar (salpique) de 0m a 50m de la línea de costa.
	En zonas de mareas		M4	Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de mareas y salpique.
Concreto con cloruros de origen diferente al medio marino	Concreto reforzado o presforzado expuesto a la incorporación de ion cloruro desde su fabricación			Cl1



CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				
Clase (ambiente de exposición)	Subclase (Condición de exposición)	Tipo de proceso	Designación (Clasificación)	Descripción
	Concreto reforzado o presforzado expuesto a una fuente externa de cloruros		CI2	Concreto expuesto a humedad y una fuente externa de cloruros.
Donde: C: Ataque por carbonatación M: Ataque por ambiente marino				

### 2.1.1.3. Requisitos de durabilidad.

La selección de las materias primas y el diseño de las mezclas de concreto con criterios de durabilidad deben hacerse siempre a partir de las características ambientales de exposición o de servicio de la estructura. La tabla 3 muestra las recomendaciones generales que deben de cumplir la mezcla de diseño de concreto para cumplir con el desempeño propuesto, que corresponde a la resistividad eléctrica húmeda. los valores de resistividad eléctrica húmeda y el recubrimiento mínimo propuesto en la tabla 4 son para que elementos estructurales de concreto Puedan alcanzar Vidas de servicio entre 80 y 100 años.

Se plantean limitaciones a la cantidad mínima de cemento CPO y relación a/c máxima, de resistividad eléctrica húmeda indicada en la tabla 4. se permiten modificaciones a estas recomendaciones de cantidad de cemento CPO, tipo de cemento (CPC, CPP, etc.), Colocar adiciones minerales (ceniza volante, metacaolín, microsílca, etc.) En reemplazo del cemento y relación a/c siempre y cuando se cumplan con los valores de resistividad eléctrica húmeda propuesta para cada ambiente de exposición indicados en la tabla 4.

1. Requisitos de dosificación y comportamiento del concreto
2. Limitaciones a los contenidos de agua y cemento
3. Permeabilidad del concreto al agua



Tabla 4. Requisitos de durabilidad según la clase de exposición

Requisitos <sup>a</sup>		Sin riesgo de corrosión	Corrosión por cloruros					
			Proveniente de agua de mar				Origen distinto del agua de mar	
			C0	M1	M2	M3	M4	CI1
Máxima relación a/c	Simple	-	-	-	-	-	-	-
	Reforzado	0.6	0.4	0.45	0.42	0.4	0.5	0.4
	Presforzado	0.6	0.4	0.42	0.38	0.35	0.4	0.35
Contenido mínimo de cemento	Simple	230	250	250	250	250	250	250
	Reforzado	250	300	380	400	450	300	450
	Presforzado	250	380	400	450	480	380	480
Resistividad húmeda mínima a 90 días (kΩ-cm)	Simple	10	20	20	20	20	20	20
	Reforzado	10	30	40	50	60	30	60
	Presforzado	20	40	50	60	70	40	70
Recubrimiento mínimo (mm)	Reforzado	25	50	55	60	70	50	70
	Presforzado	30	55	60	70	80	60	80
Contenido de aire por TMA (%)	40mm							
	20mm							
	10mm							
Requisitos adicionales para agregado			Desgaste máximo por prueba de los ángeles ≤ 40%;					
			Densidad ≥2.4;					
			Bajo contenido de materia orgánica					
Otros requerimientos		Todo tipo de cemento	Cementos con 5<C <sub>3</sub> A<8%					

Los valores en esta tabla fueron considerados para cemento tipo CPO con contenido de Clinker+ sulfato de calcio por arriba de 95% y un Blaine por arriba de 3,800cm<sup>2</sup>/g  
 En caso de utilizar otro tipo de cemento con contenido de Clinker más sulfato de calcio menor del 95% y/o Blaine por de 3,800cm<sup>2</sup>/g, se tendrán que modificar los valores de esta tabla (regularmente disminuyendo la relación agua/cemento y/o Aumentando los valores de contenido de cemento), en función de pruebas de laboratorio en el lugar, de acuerdo con lo establecido en la NMX-C-504-ONNCCE-2015 para lograr el mismo desempeño por resistividad eléctrica humedad que define la tabla.  
 Tener cuidado de que los agregados no tengan contaminación de materia orgánica, especialmente los que necesitarán del uso de aditivos plastificantes o reductores de agua, ya que, estos no reaccionan bien con la presencia de materia orgánica.  
<sup>a</sup> Los valores en esta tabla deberán de corroborarse, una vez establecido el diseño de la mezcla con los materiales componentes empleados, que cumplan con los requisitos de durabilidad.  
<sup>b</sup> valores de resistividad húmeda a temperatura de 23°C± 2°C Por el método directo conforme a lo indicado en la Norma NMX-C-514-ONNCCE-2016  
<sup>c</sup> Se permite una tolerancia de ±1.5%.  
<sup>d</sup> Para abrasión en pisos, deberá considerarse un contenido de cemento mínimo de 215 kg/cm<sup>3</sup> y 245Kg/cm<sup>3</sup> Para tamaño máximo de agregado de 40mm y 20mm respectivamente.

un concreto se considera con baja permeabilidad al agua si los resultados del ensayo de penetración del agua, a una edad no menor de 28 días de



fabricación y una permeabilidad según los requerimientos del proyecto y cumplan simultáneamente con lo indicado en la tabla 5.

Tabla 5. Requisitos en los ensayos de penetración de agua.

Clase de exposición ambiental	Especificación para la altura máxima	Especificaciones para la altura media
C	50mm	≤30 mm
M, Cl, Q y F	30mm	≤20mm

## 2.2. Tipo de cemento, agregado pétreos, sustituciones y adiciones.

### 2.2.1. Cemento

#### 2.2.1.1. Proceso de fabricación del cemento.

El proceso de fabricación empleado en determinada planta productora de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares, los diagramas de las Ilustraciones X y XX nos indican las etapas de fabricación del cemento. Básicamente las operaciones de las plantas de cemento no son iguales; pero en general todas realizan las siguientes etapas:

#### 1. Explotación de materias prima.

Este procedimiento se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre es suficiente. Una vez extraídos los materiales de las respectivas canteras (Ilustración 3.3), se llevan a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos. (Instituto del Concreto, 1997).

#### 2. Dosificación, molienda y homogenización de materias primas.

Las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y



el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

### 3. Clinkerización.

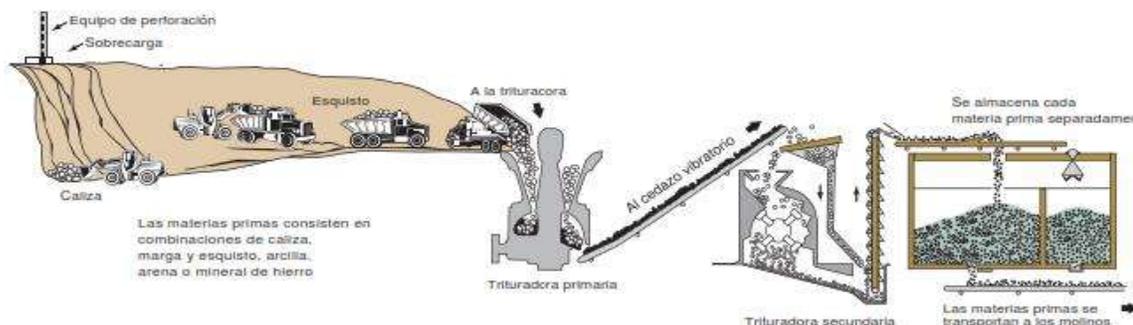
Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno, pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para calcinar es inyectando; donde las temperaturas de 1420°C a 1650°C transforman químicamente a la materia prima en clínker de cemento, que tienen la forma de pelotillas grises de 12 mm de diámetro (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

### 4. Enfriamiento.

El material transformado en clínker debe ser enfriado rápidamente a 7°C para garantizar que el cemento fabricado, después del fraguado, no presente cambio de volumen.

### 5. Molienda de clínker, adiciones de yeso.

En este proceso se transforma el clínker en polvo y se agregan las adiciones (puzolanas o escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200 y así es como se produce el cemento Portland.



1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla.

Ilustración 3. Etapa 1 del proceso de fabricación del cemento. (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

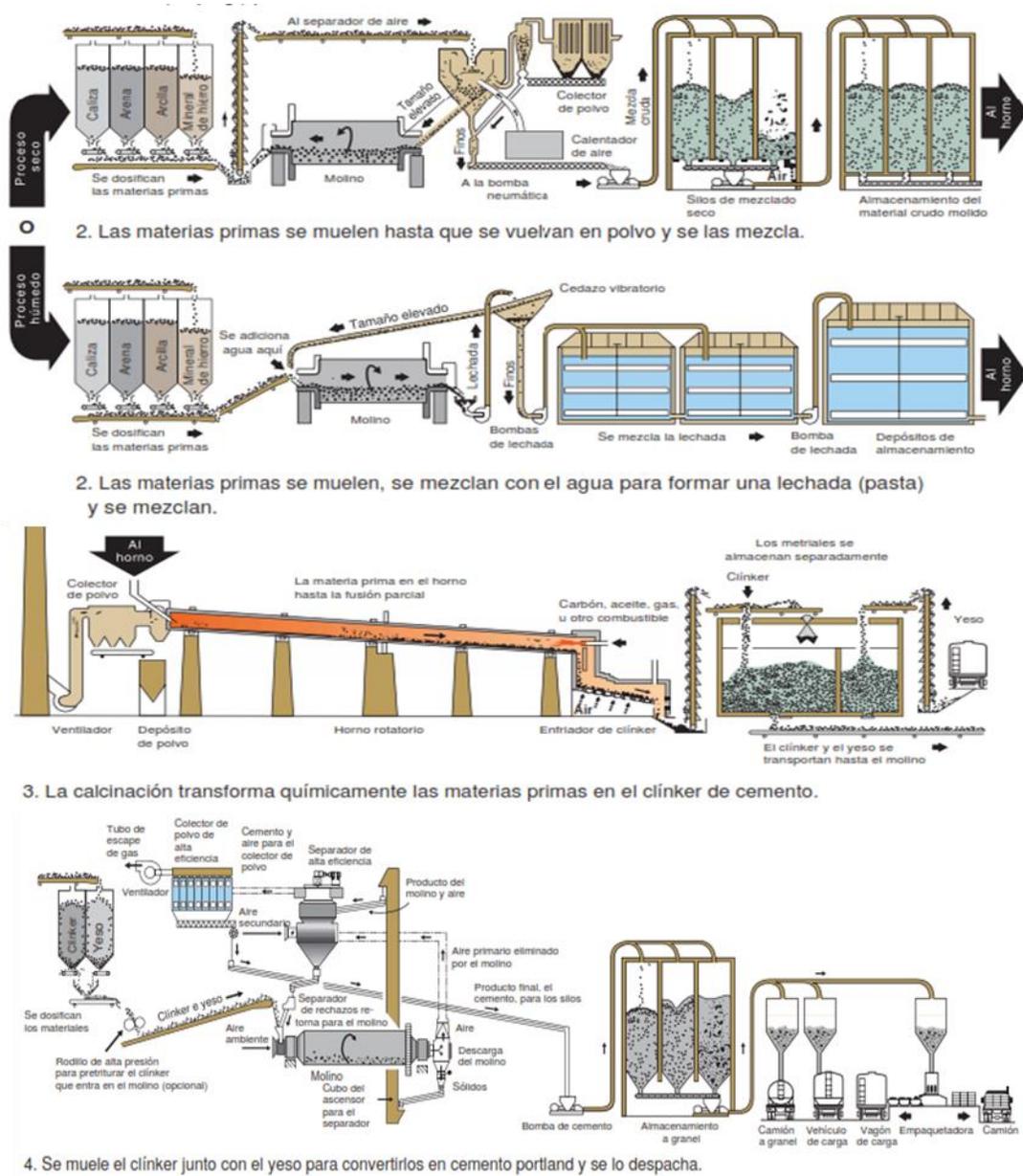


Ilustración 4. Etapas en la producción moderna del cemento Portland, a través del proceso seco (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

## 6. Empaque y distribución.

El cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posterior se empaca en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel (Concreto, 1997)



Tabla 6. Fuentes de las materias primas usadas y la fabricación del cemento Portland (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

Cal (CaO)	Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Sílice (SiO <sub>2</sub> )	Alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yeso o sulfato (CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O)
Desechos industriales	Polvo de humo de	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	horno de	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de Calcio
Calcita*	fundición	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del	Arcilla*	Ceniza volante	Arcilla*	
horno de	Mineral de hierro*	Greda	Escoria de cobre	
cemento	Costras de laminado*	Caliza	Ceniza volante*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Loes	Greda	
Creta	Ceniza de pirita	Marga*	Granodiorita	
Arcilla	Esquisto	Lavaduras de mineral	Caliza	
Greda		Cuarcita	Loes	
Caliza*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Mármol		Arena*	Esquisto*	
Marga*		Arenisca	Escoria	
Coquilla		Esquisto*	Estauroлита	
Esquito*		Escoria		
Escoria		Basalto		

\*Las fuentes más comunes.

Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento Portland.

### 2.2.1.2. Clasificación y tipos de cemento

De acuerdo con norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE-2018) se establecen las especificaciones y métodos de ensayo aplicables a los diversos tipos de cementantes hidráulicos de fabricación nacional o extranjera que se destinen a los consumidores en México.

Tabla 7. Tipos de cementos (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno



Tabla 8 Clase resistente (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

20
30
30 R
40
40 R

Tabla 9 Características especiales (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

RS Resistente a los Sulfatos
BRA Baja Reactividad Alkali agregado
BCH Bajo Calor de Hidratación
B Blanco

### 2.2.1.3. Especificaciones

Para elaborar una mezcla con el desempeño adecuado de concreto, es necesario: tomar en cuenta la capacidad requerida de carga y las condiciones de servicio del elemento a construir, definir el tipo y la cantidad de cemento, utilizar agregados de buena calidad, controlar la cantidad de agua utilizando la menor cantidad posible y mezclar de forma homogénea todos los materiales. (NMX-C-111-ONNCCE-2018) **en la tabla 10.**

Tabla 10 Componentes de los cementos

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios (1)
		Clínker Portland + Sulfato de calcio	Principales			Caliza	
			Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (2)	Humo de Sílice		
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	---	---	---	---	0-5



Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					Minoritarios (1)
		Clínker Portland + Sulfato de calcio	Principales			Caliza	
			Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (2)	Humo de Sílice		
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	---	6-50	---	---	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	---	---	0-5
<b>CPC</b>	<b>Cemento Portland Compuesto</b>	<b>50-94</b>	<b>6-35</b>	<b>6-35</b>	<b>1-10</b>	<b>6-35</b>	<b>0-5</b>
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	---	---	1-10	---	0-5
CEG	Cemento de Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	61-80	---	---	---	0-5

#### 2.2.1.4. Cemento utilizado en la investigación

Para la elaboración de las mezclas se empleó un cemento Portland Compuesto de clase 30 con resistencia especificada a 3 días y resistencia a los sulfatos, es decir un cemento **CPC 30R-RS**.



Ilustración 5 Cemento utilizado para elaboración de mezclas de concreto CPC 30R-RS



## 2.2.2. Agregados pétreos

Los agregados son materiales de naturaleza pétreo que, al ser mezclados con cementantes, permiten según el caso la elaboración de concretos y morteros. (NMX-C-111-ONNCCE-2018). Las fuentes de abastecimiento de agregados son los depósitos fluviales, eólicos, glaciares, volcánicos, marítimos, lacustres, canteras, almacenes de plantas de procesamiento o fabricación de agregados artificiales. (NMX-C-030-ONNCCE-2004)

### 2.2.2.1. Especificaciones

De acuerdo a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, los agregados deben cumplir las siguientes especificaciones.

#### Granulometría para los agregados finos y gruesos.

##### Agregados finos.

- a. Cumplir con los límites granulométricos expresados en la **siguiente tabla.**

Tabla 11. Límites de granulometría para agregado fino (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

Malla	Material acumulado en masa, en porcentaje; % que pasa
9.5 mm (3/8")	100
4.75mm (No. 4)	95-100
2.36mm (No.8)	80-100
1.18mm (No. 16)	50-85
0.600mm (No. 30)	25-60
0.300mm (No. 50)	10-30
0.150mm (No. 100)	2-10

- b. Módulo de finura comprendido entre 2.30 y 3.10.
- c. El retenido parcial de la masa total en cualquier malla no debe ser mayor que 45%.
- d. En caso de que no cumpla las especificaciones, pueden utilizarse en caso de que existan antecedentes de comportamiento aceptable en el concreto elaborado con ellos, y que, se haga un ajuste apropiado en el



proporcionamiento del concreto para compensar las deficiencias en la granulometría.

### Agregado grueso.

1. Debe cumplir con los límites granulométricos de la **tabla 12.**

Tabla 12. Límites de granulometría del agregado grueso, en masa (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

Tamaño nominal, mm	100 (4")	90 (3.5")	75 (3")	63 (2.5")	50 (2")	37.5 (1.5")	25 (1")	19 (3/4")	12.5 (1/2")	9.5 (3/8")	4.75 (No. 4)	2.36 (No. 8)	1.18 (No. 16)
90.0 a 37.5 (3.5" a 1.5")	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
63.0 a 37.5 (2.5" a 1.5")	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
50.0 a 25.0 (2" a 1")	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
50.0 a 4.75 (2" a No. 4)	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
37.5 a 19.0 (1.5" a 3/4")	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
37.5 a 4.75 (1.5" a No. 4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
25.0 a 12.5 (1" a 1/2")	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
25.0 a 9.5 (1" a 3/8")	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
25.0 a 4.75 (1" a No. 4)	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
19.0 a 9.5 (3/4" a 3/8")	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
19.0 a 4.75 (3/4" a No. 4)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
12.5 a 4.75 (1/2" a No. 4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
9.5 a 2.36 (3/8" a No. 8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

2. Cuando se tengan agregados gruesos fuera de los límites indicados en la tabla anterior, se deben procesar para que satisfagan dichos límites.
3. En caso de aceptar que los agregados no cumplan con estos límites, debe ajustarse el proporcionamiento del concreto para compensar la deficiencia granulométrica, por lo tanto, debe demostrarse que el concreto elaborado tiene un comportamiento adecuado.



## 2.2.2.2. Agregado utilizado en la investigación

### 2.2.2.2.1. Agregado fino

Para todas las mezclas se utilizó un solo agregado fino.

1. Arena de origen volcánico convencional proveniente del banco de materiales en “La Unión” en la comunidad Joyitas, ubicado en el kilómetro 28 de la carretera Morelia-Quiroga en la entrada a la comunidad de San Bernabé, Morelia, Michoacán, México.



Ilustración 6. Arena de origen volcánico, proveniente del banco de materiales “La unión”. (García Romero, 2021)



Ilustración 7. Banco de Materiales “La Unión” Joyitas. Macrolocalización (izquierda) y microlocalización (derecha). (Google Maps, 2021)



### 2.2.2.2. Agregado grueso

Se utilizaron dos tipos de agregados grueso.

1. **Agregado triturado natural**, proveniente de “Trituradora TRICKAL”, ubicada en el Km 14 de la carretera Morelia-Salamanca, Mesón Nuevo, Michoacán, México.



Ilustración 8. Trituradora TRICKAL, macrolocalización (izquierda), microlocalización (derecha). (Google Maps, 2021)



Ilustración 9. Grava Triturada proveniente del trituradora TRICKAL (García Romero, 2021)



2. **Agregado triturado reciclado** producto de la demolición del Hospital General Regional no 1. IMSS Ubicado en la avenida Nocupétaro de la ciudad de Morelia, Michoacán México.



Ilustración 11. Torre del IMSS de donde se obtuvo el agregado reciclado producto de su demolición. (Jiménez, La Voz de Michoacán, 2020)



Ilustración 10. Agregado de concreto reciclado producto de demolición (RCA) (García Romero, 2021)

### 2.2.3. Sustituciones puzolánicas

Las puzolanas son materiales silíceos o silíceos y aluminosos, tales como la ceniza volante o el humo de sílice, que, por sí mismos, poseen poco o nulo valor cementante, pero cuando están finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas normales, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.



Se utilizaron dos cenizas artificiales como adición al concreto.

1. La **ceniza de Bagazo de Caña (CC)** proviene de “Ingenio Pedernales” que se encuentra en la población de Pedernales, Municipio de Tacámbaro, Michoacán, a 120 Km de Morelia, Michoacán, México.



Ilustración 12. El ingenio Pedernales. (Ingenios Santos)

2. La Ceniza de horno producto de la elaboración de ladrillo (CH) fue extraída de Tenencia Morelos la cual pertenece al municipio de Morelia, Michoacán, México.



Ilustración 13. Mapa de tenencia Morelos (Google Maps, 2021)



Ilustración 14. Tenencia Morelos, Morelia, Michoacán, México. (Jiménez, 2019)



Ilustración 15. Leña de Pino utilizada para la quema de los hornos en que se cocerán los ladrillos. (Bernabé Reyes, 2012)



Ilustración 16. Extracción de la ceniza del horno de cocción del ladrillo, utilizando palas. (Bernabé Reyes, 2012)

## 2.2.4. Adiciones

### 2.2.4.1. Fluidificante

Se utilizó una fluidificante marca “Christianson” en las mezclas con relación  $a/c=0.45$  en una proporción de 8ml por cada kilogramo de cemento de acuerdo a la ficha técnica y así mejorar la trabajabilidad.

De acuerdo a la ficha técnica emitida por la empresa Christianson, S.A. de C.V., la cual distribuye el aditivo como producto comercial líquido, CRISOTAN® R-5 es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que provocan la atracción entre ellas provocando que la mezcla de concreto se plastifique, permitiendo que se coloque fácilmente. Además, este superplastificante, permite que se reduzca la relación agua/cemento. Esto resulta en un incremento directo de la resistencia inicial y final a compresión simple.

El CRISOTAN® R-5 es un agente no tóxico, que no provoca espuma y que, al ser sintético, presenta propiedades uniformes en cada lote. Su estabilidad térmica se garantiza hasta los 150° C. Su temperatura de descomposición es a los 380° C. En dosificaciones normales, el Crisotan® R-5 no afecta al calor



de hidratación del concreto; no contribuye a la corrosión del acero, ni al crecimiento de microorganismos.

Tabla 13. Propiedades típicas del superplastificante CRISOTAN® R-5 (Christianson, S.A. de C.V.)

CRISOTAN® R-5 LÍQUIDO	
Apariencia	Líquido ámbar oscuro.
% Ingrediente activo	40%
Densidad g/ml	1.2
Solubilidad en soluciones al 10%	Clara

La plasticidad que imparte a una mezcla de concreto produce una fluidez en el llenado del molde, cuando los moldes se retiran, el concreto resulta De superficie más uniforme y sin accidente.

El superplastificante mejora la fluidez del concreto, así mismo permanece con cohesión y retiene su relación agua/cemento sin sangrado, sin segregación y al aumentar el revenimiento no hay pérdida en la resistencia.

La dosificación del superplastificante se basa en el contenido de cemento de la mezcla de concreto.

Tabla 14. Ejemplo de dosificación del CRISOTAN R-5 (aditivo fluidificante) en polvo para una mezcla de concreto. (Christianson, S.A. de C.V.)

% Ingrediente activo (base seca)	Volumen CRISOTAN® R-5 líquido (ml)	Peso CRISOTAN® R-5 líquido (g)	Peso del agua en el CRISOTAN® R-5 líquido (g)
0.2	430	516	155
0.3	645	774	310
0.4	860	1032	620
0.5	1075	1290	775
0.6	1290	1596	930
0.7	1505	1806	1085
0.8	1720	2064	1240



Para mejorar resultados, el CRISOTAN® R-5 LÍQUIDO se debe añadir a la mezcla de concreto antes del colado. Los periodos de mezclado deben ser de 1 a 2 minutos en mezcladoras eficientes, y de 5 a 7 minutos en revolvedoras.

#### **2.2.4.2. Agua**

El agua utilizada provenía de la red de agua potable de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en el Laboratorio de materiales. Dicha agua debe cumplir ciertos parámetros de calidad, como lo indica la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004.



### 3. Metodología

En la ilustración 17 se muestra los pasos del proceso de investigación de este trabajo.

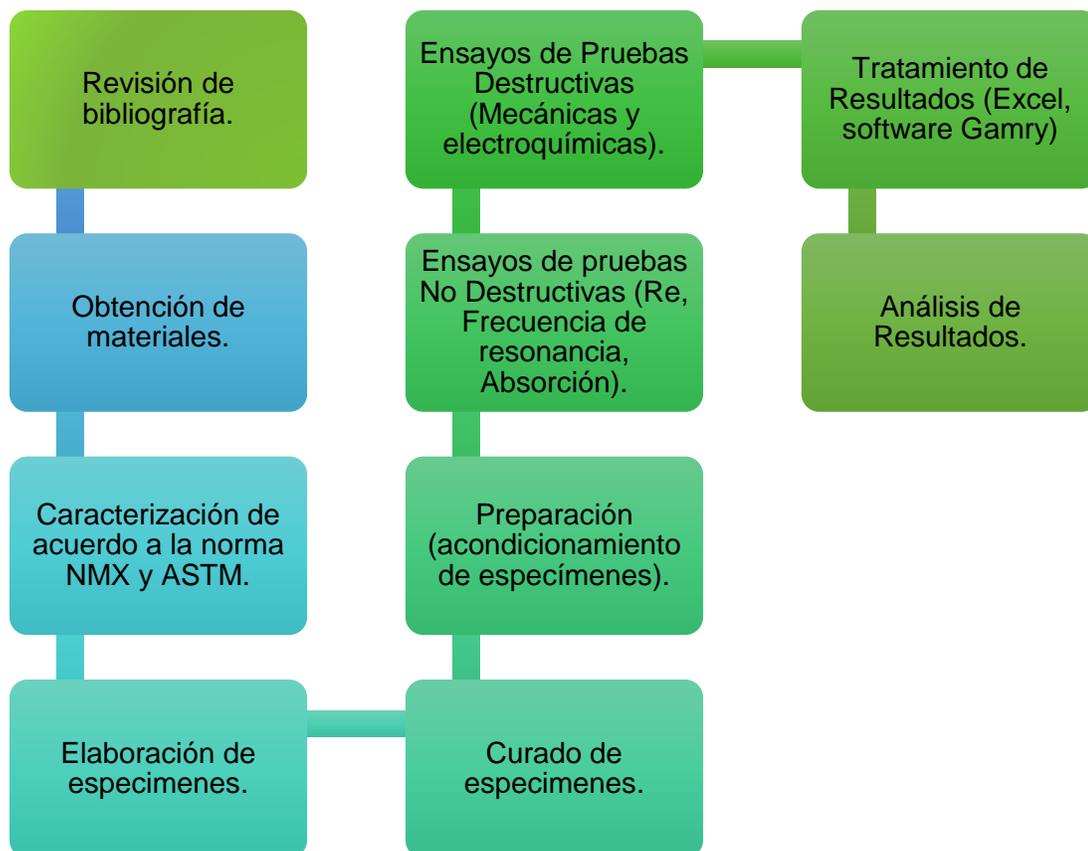


Ilustración 17. Esquema de secuencia de la metodología experimental.

#### 3.1. Procedimientos de prueba en la caracterización de los materiales.

##### 3.1.1. Cemento.

El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado que, al agregar agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava y otros materiales



tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua en virtud de reacciones químicas durante la hidratación que, una vez endurecido, desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad. El nombre genérico y comúnmente aceptado por los usuarios es “cemento”. (Kosmatka, Steven, & al., 2004.)

#### **3.1.1.1. Consistencia normal del cemento hidráulico.**

La consistencia normal es la cantidad de agua para que la aguja de 1cm de diámetro del aparato de Vicat penetre dentro de la pasta de cemento elaborada con dicha agua,  $10\text{mm}\pm 1\text{mm}$  bajo la superficie de la pasta, durante 30 segundos después de haber iniciado la prueba.

El objetivo de la prueba es determinar la cantidad de agua necesaria de forma que al combinarla con cemento hidráulico sirva como referencia para efectuar distintas pruebas al cemento.

#### **Materiales y equipo**

- Muestra representativa de cemento.
- Agua destilada o agua o limpia.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo y cristal liso.
- Recipiente para realizar la mezcla del cemento con el agua.}
- Pesas con las variaciones permitidas en la tabla A.S.T.M. C187-55.
- Probeta graduada de 100ml y 200ml con aproximación a 1ml y 2ml respectivamente.
- Aparato de Vicat

#### **Procedimiento**

1. Obtener la muestra representativa de cemento.
2. Pesar 650g de cemento y verter sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y con ayuda de una pequeña espátula se forma una especie de cráter con el cemento.
3. Fijar una cantidad de agua expresada en porcentaje. Respecto al peso del cemento seco, se mide en la probeta graduada y verter en el centro



del cráter. En cuanto el agua toca el cemento se comienza a medir el tiempo con ayuda del cronómetro.

4. Con la espátula llevar el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca (hacerse en un máximo de 30 segundos).
5. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (El operador se colocará guantes de látex aprovechando el tiempo dado).
6. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 90 segundos, contados a partir de los anteriores.
  - a) En los primeros 30 segundos mezclar perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla con la parte pesada de las manos, hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
  - b) En los siguientes 30 segundos formar una esfera con la pasta y se pasa de una palma a la otra, a una distancia aproximada e 15cm, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe repetir 6 veces.
  - c) En los últimos 30 segundos, descansar la bola en la palma de la mano e introducir a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se debe sostener con la otra mano llenando completamente el anillo con pasta (la otra boca descansará sobre un cristal).
  - d) Remover el exceso de pasta que permanezca en la boca grande con un movimiento de la palma de la mano.
  - e) Colocar el anillo descansando en su base mayor sobre una placa de vidrio y enrasar la boca superior con una espátula que se mantendrá formando un pequeño ángulo en el borde de la cuchara durante las operaciones de enrasado y enlisado, debe tenerse cuidado de no comprimir La pasta.



7. Determinación la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un émbolo, colocar en contacto con la superficie de la pasta y sujetar al tornillo; después colocar el indicador móvil F en la marca cero ubicado en la parte superior de la escala (todo lo anterior se puede hacer previo al realizado de la mezcla para ya no entretenerse ya que esto se debe hacer dentro de los 30 segundos).
8. Dejar caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, ya pasados 30 segundos y tomar la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , tomar esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento. Si la lectura no es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , repetir el procedimiento antes descrito hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento.

(NMX-C-057-ONNCCE-2015; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### **3.1.1.2. Tiempo de fraguado del cemento hidráulico.**

Utilizando el “Procedimiento de Vicat” para tiempo de fraguado del cemento hidráulico especificado en la norma NMX-C-059-ONNCCE-2017.

#### **Equipo.**

- Aparato de Vicat.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Pesas

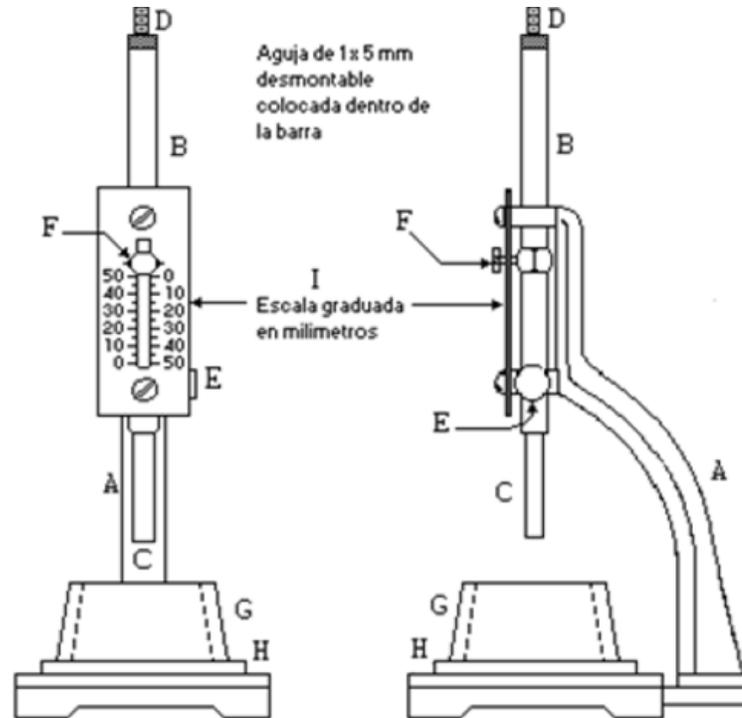


Ilustración 18. Aparato de Vicat (NMX-C-059-ONNCCE-2017)

### Procedimiento.

1. **Temperatura y humedad.** La temperatura del laboratorio, material y equipo deben mantenerse entre 20°C y 27°C. La temperatura del agua de mezclado y la cámara de humedad debe ser de 23°C±2°C. La humedad relativa del laboratorio no será inferior a 50.
2. **Preparación de la muestra.** Siguiendo el procedimiento descrito en la norma NMX-C-057-ONNCCE para la determinación de la consistencia normal, mezclar 650g con un porcentaje de agua requerido para obtener la consistencia normal.
3. **Moldeo del espécimen.**
  - a. Con la pasta preparada como incida la prueba de la consistencia normal, moldear la pasta como se indica en el inciso 5.c de la prueba mencionada.
  - b. Inmediatamente colocar el espécimen de prueba en el cuarto húmedo y mantener ahí. El espécimen debe permanecer en el



molde cónico sobre la placa de vidrio durante el periodo de prueba.

#### 4. Determinación del tiempo de fraguado.

- a. Mantener el espécimen en cuarto húmedo durante 30 minutos y determinar la penetración de la aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Vicat y posteriormente hacerlo cada 15 minutos, hasta obtener una penetración de 25 mm o menor.
- b. Para la determinación de la penetración.
- c. Bajar la barra “B” hasta que la aguja “D” quede en contacto con la superficie de la pasta, en este punto fijar la barra “B” con el tornillo “E”.
- d. Colocar el indicador “F” a una lectura cero en la escala, o se toma una lectura inicial.
- e. Aflojar el tornillo “E”, con lo que la barra queda suelta y cae sobre la superficie de la pasta en la cual penetra. A los 30 segundos de haber caído apretar el tornillo “E” y tomar la lectura en la escala para determinar la penetración de la aguja.
- f. Soltar la barra aflojando el tornillo “E” y dejar caer libremente cuando se efectúen las determinaciones de tiempo de fraguado. No efectuar penetraciones a una distancia menor de 5 mm una de otras y ninguna de ellas se hará a una distancia menor de 10 mm de la parte interior del molde.
- g. Registrar todas las lecturas de las penetraciones y por interpolación determinar el tiempo correspondiente a la penetración de 25 mm; este es el tiempo de fraguado inicial.
- h. El tiempo de fraguado final es aquel en el que la misma aguja no penetra visiblemente en la pasta. (NMX-C-059-ONNCCE-2017; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)



### 3.1.1.3. Determinación de la Densidad del cemento hidráulico

La densidad de los cementantes hidráulicos, es la relación de la masa del cementante en gramos, entre el volumen en mililitros que desplaza al introducirse en un líquido, con el cual no se efectúe reacción química alguna.

#### Equipo

- Muestra representativa de cemento.
- Matraz de Le Chatelier
- Balanza con aproximación a los 0.1gramos.
- Reactivo: petróleo.
- Recipiente con agua.
- Termómetro.
- Embudo

#### Procedimiento

1. Llenar el matraz de Le Chatelier con el reactivo (petróleo) hasta un nivel entre 0 y 1 ml. Secar el interior del matraz arriba del nivel del líquido (para evitar la adherencia del cemento en las paredes internas).
2. Registrar la primera lectura después de haberse sumergido el matraz en un baño de agua la cual, debe encontrarse a la temperatura del laboratorio y mantenerse constante a lo largo del ensayo.
3. Colocar el cemento dentro del área de ensayo para que este tome la temperatura del laboratorio. Pesar 60g de cementante con una aproximación de 0.05g e introducir en pequeñas porciones dentro del matraz.

**Nota:** Tener cuidado para evitar que ocurran salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cielo superior del matraz.



- Colocar el tapón del matraz y desalojar el aire que hay sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se hace rodar el matraz en posición inclinada sobre una superficie plana cubierta con una franela, para evitar que el matraz tenga alguna ruptura.

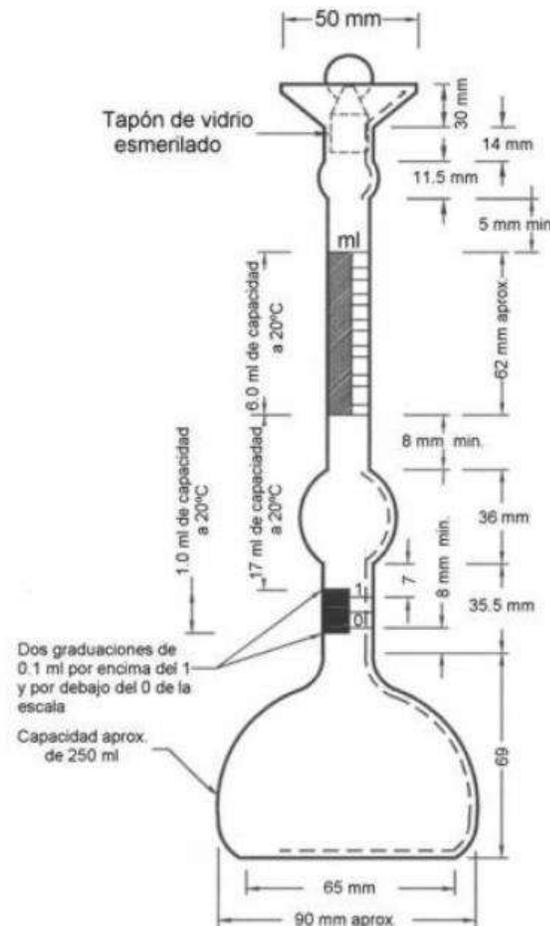


Ilustración 19. Matraz de Le Chatelier (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

- Sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura y después tomar la segunda lectura en la parte graduada superior.

### Cálculos.

La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por el peso de cementante empleado en el ensayo.



La densidad se calcula como:

$$\rho = \frac{\text{Masa del cementante, en g}}{\text{Volumen del líquido desplazado, en cm}^3 \text{ (ml)}} = \rho (\text{g} / \text{cm}^3) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

Los resultados obtenidos se reportan al 0.01g/cm<sup>3</sup> (NMX-C-152-ONNCCE-2015; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

### **3.1.2. Agregado grueso y fino**

El agregado grueso es el material comúnmente conocido como grava que se retiene en la malla de 4.75mm (No. 4) y pasa totalmente por la malla de 75mm (3pulgadas) y cuya composición granulométrica varía entre límites especificados. (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

Mientras que, el agregado fino es el material comúnmente conocido como arena que pasa por la malla 4.75mm (No. 4) y se retiene en la malla de 0.075mm (No. 200) y cuya composición granulométrica varía entre límites especificados. (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

#### **3.1.2.1. Trituración del agregado Reciclado (RCA) producto de demolición.**

Debido a una falla geológica activa en el terreno sobre el que se ubicaba la Torre médica principal del Instituto Mexicano del Seguro Social, ubicada en la avenida Madero Poniente No. 1200, C.P. 58000, de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, se determinó su demolición por cuestiones técnicas y de seguridad a la población.



Del lugar, se extrajeron bloques de concreto (de distintas zonas de la demolición) y de esa forma obtener una muestra representativa de toda la torre demolida.

El proceso de trituración, se llevó a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana, con lo cual, se obtuvieron los tamaños adecuados del agregado para la elaboración de las mezclas de concreto. (Contreras Marin, 2013)

### Equipo

- Trituradora marca Denver, de quijadas fijas con 5 cm por 10 cm de separación entre quijadas.
- Malla No 4 (4.76mm)

### Procedimiento

1. Se seleccionaron los bloques en el lugar de demolición considerando la separación de quijadas de la trituradora Denver.
2. Se colocaron los bloques en la trituradora Denver.
3. Una vez triturado el material, se clasificó el material con respecto a sus diámetros, por medio de la malla No 4. El material que se retenía en la malla No 4 se sustituye como grava, mientras que, el material que pasa la malla No 4, es decir, el material menor a 4.76mm se clasifica como arena reciclada.
4. De la muestra triturada, el 67.67% correspondía a grava y el 32.33% a arena.

#### 3.1.2.2. Cuarteo del agregado

El cuarteo debe hacerse únicamente cuando el volumen del material de estudio es considerable y solo se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio. (NMX-C-030-ONNCCE-2004)



### Equipo y material

- Muestra de agregado grueso o agregado fino
- Charolas grandes de lámina.
- Cucharones.
- Cuarteador de muestras.

### Procedimiento.

Existen 3 procedimientos de cuarteo de las muestras.

1. Método de Cuarteo Mecánico.
2. Método de Cuarteo Manual o “cuarteo por paleado”.
3. Método con un trozo de plástico

Para cuartear el agregado fino se aplicó el método de **cuarteo mecánico** descrito a continuación:

1. Se toma la muestra y se coloca en una charola ancha y se realiza el vaciado sobre la parte superior del divisor o cuarteador mecánico, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.
2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo.
3. Si se desea una muestra más pequeña, el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, repitiendo el proceso de división y eliminación, cuantas veces sea necesario, hasta lograr la muestra del tamaño requerida. (NMX-C-030-ONNCCE-2004; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

Para el agregado grueso se aplicó el método de cuarteo manual siguiente:

1. Vaciar la muestra de material en una superficie limpia y dura.
2. Cambiar el material al extremo opuesto, este cambio se hace por medio del paleo, tratando de revolver todo el material, además procurar apilar el material en forma cónica. Repetir 3 veces.



3. Aplanar la forma cónica del material por la parte superior por medio de la cara posterior de la pala.
4. Dividir el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal aplanada del material.
5. Eliminar las dos porciones opuestas, el material sobrante sirve para realizar las pruebas correspondientes.
6. Para disminuir aún más el tamaño de la muestra se repite el proceso anterior. (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

### **3.1.2.3. Humedad actual.**

El objetivo de la prueba es, determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va a utilizar para elaborar la mezcla, para de esa forma realizar los ajustes necesarios por humedad en el proporcionamiento de elaboración de mezclas.

#### **Equipo**

- Muestra representativa de arena o grava (NMX-C-030-ONNCCE-2004)
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla de gas.
- Charolas metálicas.
- Espátulas
- Cristal.
- Franela.

#### **Procedimiento.**

1. Se reduce la muestra representativa material (300g en caso de arena y 500g para la grava), registrando este valor como masa húmeda actual (Mh)
2. Colocar la muestra en una de las charolas metálicas sobre la parrilla de gas. Para secarlo homogéneamente se debe mover constantemente el



agregado con una espátula hasta eliminar completamente la humedad del material.

3. Para comprobar que el material está completamente seco, colocar el cristal sobre el material y en el momento en que este ya no se empañe se deja enfriar el material hasta que alcance una temperatura ambiente.
4. Medir la masa final o masa seca de la muestra ( $M_s$ ).

### Cálculos.

$$\% \text{Humedad actual} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

Ecuación 2

Donde:

$M_h$ = Masa húmeda actual (g)

$M_s$ = Masa seca (g)

$M_h - M_s$ = masa de agua que contenía el material.

(NMX-C-166-ONNCCE-2017.; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### 3.1.2.4. Humedad de absorción.

La absorción es el incremento en la masa del agregado seco, cuando es sumergido en agua durante 24 horas a temperatura ambiente. Este aumento de masa es debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como porcentaje de la masa seca y es índice de la porosidad del material. (NMX-C-165-ONNCCE-2019)

### Equipo.

- Una muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Una parrilla de gas.
- Charolas metálicas.
- Un cono metálico (truncocónico).
- Un pisón.
- Una espátula.



- Una franela

### Procedimiento para agregados finos.

1. Se obtiene la muestra de arena mediante el método de cuarteo anteriormente descrito. Dicha muestra de 2 kilogramos se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo.
2. Al término de este tiempo, secar superficialmente la arena, colocando una parte de la arena saturada en la charola sobre la parrilla de gas con el propósito de hacer el secado de la arena en forma superficial. Por medio del molde troncocónico se puede saber cuándo la arena está seca superficialmente. Dicho método se describe a continuación:
  - a. Colocar el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo
  - b. Llenar el molde con la arena en 4 capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón; 10 golpes en la primera capa, 10 en la segunda, 3 en la tercera y 2 en la última capa.
  - c. Inmediatamente retirar el cono.

**Nota:** Si la arena trata de disgregarse quiere decir que ya está seca superficialmente. Si por el contrario la arena mantiene la forma del cono significa que la arena conserva agua en exceso, por lo tanto, hay que continuar secando el material hasta que se obtenga el secado superficial.
3. Cuando la arena está superficialmente seca, pesar una muestra de 300g, registrar esta masa como Masa saturada y superficialmente seca (Mh).
4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Colocar el cristal sobre el material para saber cuándo el material está seco, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco.



6. Pesar el material y registrarlo como masa seca del material ( $M_s$ ), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material hasta secarlo completamente.

#### Procedimiento para agregado grueso.

1. Poner a saturar una muestra de grava de 1kg durante 24 horas
2. Pasadas las 24 horas, con una franela secar superficialmente una muestra de 300g, anotar como valor inicial ( $M_h$ )
3. Colocar este material en una charola sobre la parrilla para secarlo.
4. Asentar el cristal sobre la muestra de grava, si no se empaña quiere decir que el material está seco.
5. Dejar enfriar la muestra, sacar su masa y registrarla como masa seca ( $M_s$ )

#### Cálculo

$$\% \text{Humedad de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$M_h$ = Masa saturada y superficialmente seca (g)

$M_s$ = Masa seca (g)

(Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011; NMX-C-166-ONNCCE-2017.)

#### 3.1.2.5. Densidad

En esta prueba se determina la densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca.

#### Equipo

- Muestra de agregado pétreo
- Picnómetro.
- Probeta de 500ml o 1000ml
- Charolas
- Agua



- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Espátulas

### Procedimiento

1. Tomar una muestra del agregado y reducir por cuarteo a un volumen por lo menos del doble del picnómetro a emplear.
2. Saturar muestra durante 24 horas y secar superficialmente.
3. Determinar la masa (Mm) de un volumen de muestra, cuyo volumen sea entre un 33% a 50% del volumen del picómetro.
4. Llenar picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, colocar en superficie plana.
5. Vaciar la muestra de agregado dentro del picnómetro y recibir el agua desalojada con una probeta graduada, el valor que marque la probeta se registra como el volumen ocupado por las partículas de grava (V).

### Cálculos.

$$D = \frac{M}{V}$$

Ecuación 4

Donde:

D=Densidad en (g/cm<sup>3</sup>)

M=Masa de agregado (g)

V=volumen del agregado (cm<sup>3</sup>)

(Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011; NMX-C-165-ONNCCE-2019)

#### 3.1.2.6. Determinación de la masa volumétrica seca y suelta (MVSS).

La masa volumétrica seca de los agregados es, la masa seca del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material en un recipiente especificado. (NMX-C-073-ONNCCE-2004)

### Equipo

- Una muestra de agregado completamente seca.
- Un recipiente de masa y volumen conocido.



- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una báscula
- Un cucharón y una pala.

#### Procedimiento.

1. Cuartear el material según la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004.
2. Vaciar agregado dentro del recipiente dejándose caer a una altura de aproximadamente 5 centímetros, medida a partir de la arista superior del recipiente, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.
3. Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo.
4. A la masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.

#### Cálculos.

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Ecuación 5

Donde:

M.V.S.S.= Masa volumétrica seca y suelta (g/cm<sup>3</sup>)

M= Masa del agregado (g)

V= Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>)

(Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### 3.1.2.7. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

El objetivo de la prueba es obtener la masa por unidad de volumen de un agregado pétreo, cuando el material tiene una determinada compactación.

(Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)



### Equipo.

- Una muestra de agregado completamente seco.
- Un recipiente de masa y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una báscula
- Un cucharón y una pala.

### Procedimiento.

1. Llenar el recipiente con agregado dejándolo caer a una altura aproximada de 5 centímetros, debe llenarse en 3 capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material. Cuidando que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.
2. Enrasar el recipiente con la varilla punta de bala y limpiar todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.
3. Pesarse el recipiente con el material y restar el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.

Cálculos.

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V}$$

Ecuación 6

Donde:

M.V.S.V. = Masa volumétrica seca y varillada (g/cm<sup>3</sup>)

M = Masa del agregado pétreo (g)

V = Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>)

(NMX-C-073-ONNCCE-2004; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### 3.1.2.8. Granulometría en el agregado fino (arena).

La granulometría más conveniente para el agregado fino, depende del tipo de trabajo, de la riqueza de la mezcla, y del tamaño máximo del agregado grueso.



En mezclas más pobres, o cuando se emplean agregados gruesos de tamaño pequeño, la granulometría que más se aproxime al porcentaje máximo que pasa por cada criba resulta lo más conveniente para lograr una buena trabajabilidad. Entre más uniforme sea la granulometría, mayor será la economía. (Arqhys Construcciones, 2012)

### Equipo.

- Charolas.
- Cucharón
- Balanza con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra.
- Horno ventilado y que sea capaz de mantener una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Cribas.
- Máquina agitadora para el cribado.

### Procedimiento.

1. Preparar la muestra de agregado fino de acuerdo a la NMX-C-030-ONNCCE-2004 y humedecer la muestra antes de iniciar la reducción de tamaño para evitar la segregación.
2. Cuando el material este seco y frío, tomar 500 gramos, medidos al décimo de gramo.
3. Colocar las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), vaciando la muestra de 500 gramos en la parte inferior, para posteriormente tapar la malla de mayor abertura.
4. Una vez tapado el juego de mallas, con ayuda del agitador mecánico (Raf-tap), agitar la muestra durante un tiempo de 10 minutos como mínimo.
5. Proceder a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando las masas en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y con ayuda de un cepillo de alambre desalojar el material que se



encuentra entre los espacios de las mallas 4, 8, 16 y 30, mientras que las mallas 50, 100 y 200 se limpiarán con cepillo de cerdas.

6. En una superficie horizontal y limpia colocar siete hojas de papel y sobre ellas el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error.
7. Por último, determinar la masa retenida en cada criba por medio de una balanza que se especifica en esta prueba, y se calculan los porcentajes hasta los décimos.

Hacer un reporte o informe del análisis granulométrico con ayuda de una tabla como la que se muestra a continuación:

Tabla 15. Registro de datos granulométricos de agregados finos.

(1) Malla	(2) Masa retenida	(3) % Retenido	(4) % Acumulativo	(5) % que pasa
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
Charola				
Suma				

### Cálculos

1. Anotar los pesos en las respectivas mallas en la columna (2) de la tabla 7.
2. El retenido de la columna (3) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{Suma masa retenida}} * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

3. El % acumulativo (4) se calcula a partir de los datos de la columna (3) como sigue:

$$\% \text{ acumulativo} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior} \quad \text{Ecuación 8}$$

4. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:



$$\% \text{ que pasa la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de malla} \quad \text{Ecuación 9}$$

Se calculan los porcentajes basándose en la masa total de la muestra incluyendo el del material que pasó la criba 0.075 mm (malla No. 200).

5. Módulo de finura:

$$M. F. = \frac{\text{Suma del \% acumulativo de todas las mallas sin incluir la charola}}{100} \quad \text{Ecuación 10}$$

(Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

### 3.1.2.9. Granulometría en el agregado grueso (grava)

#### Equipo

- Charolas y cucharón.
- Balanza con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra.
- Horno ventilado y que sea capaz de mantener una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
- Cribas.

#### Procedimiento.

1. Secar la muestra a una temperatura constante de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y cuando el material este seco y frío, hacer el cuarteo para obtener una muestra de aproximadamente la capacidad del recipiente con el que se hizo la prueba de masas volumétricas.
2. Trabajar individualmente cada malla (1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8" y No. 4) usando tres charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma.
  - a. Colocar en la primera charola la muestra seca, a la que previamente se le ha determinado la masa. Dentro de la segunda charola poner la malla de mayor tamaño y con el cucharón colocar las porciones de la muestra, en cantidad tal que no cubran la malla con más de una capa de partículas.
  - b. Agitar la malla con ambas manos y verificar que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta. Cuando ya no pase



material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola, continuando con la siguiente porción de la misma manera, haciéndolo consecutivamente hasta cribar toda la muestra.

- c. Determinar y registrar la masa retenida de cada malla, con lo que se libera la tercera charola, que pasa a ser la segunda para el siguiente proceso, con la malla subsecuente.
3. Aplicar el mismo procedimiento con las mallas siguientes, depositando el material que pasa en la segunda charola y el retenido en la tercera, concluyendo al llegar a la malla N°4 donde se determina y registra la masa del material que pasó esta última malla.
4. Comparar la masa total del material del cribado con la masa original al inicio de la prueba. Si la cantidad difiere en más de un 0.3% los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.

### Cálculo.

Tabla 16. Registro de datos de granulometría para agregados gruesos.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Malla	Masa retenida	% Retenido	% Acumulativo	% que pasa
1 1/2"				
1"				
3/4"				
1/2"				
3/8"				
1/4"				
No 4				
Pasa No 4				
Total				

Llenar las columnas como se indica a continuación:

1. Escribir los números de mallas en orden decreciente.
2. Anotar las masas retenidas en las respectivas mallas.
3. Anotar porcentajes del material retenido en cada malla, respecto a la masa total de la muestra, mediante la siguiente ecuación:



4. Anotar los porcentajes retenidos acumulados con la siguiente operación:
5. Anotar los porcentajes que pasa según esta ecuación:
6. El tamaño máximo (T.M.) del agregado es la dimensión de malla que retenga un valor lo más cercano al 5% (por encima). (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011; NMX-C-077-1997-ONNCCE)

### 3.1.2.10. Colorimetría en arenas.

Este ensayo permite determinar en forma aproximada el índice de contaminación y proporciona en su caso, una advertencia de que es necesario efectuar otros ensayos antes de su utilización.

#### Equipo y material.

- Muestra representativa de arena.
- Tres botellas iguales de plástico incoloro de 250 a 350 cm<sup>3</sup> con marcas a cada 25 cm<sup>3</sup>.
- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 3 % (sosa cáustica).
- Charolas, parrillas de secado, espátulas, balanza, vasos de precipitado.
- Agua destilada.
- Material para las soluciones y tabla colorimétrica.

Tabla 17. Colores patrón para tabla de colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE-2019)

Código de colores (escala Gardner)	Patrón de colores No.
5	1
8	2
11	3 (estándar)
14	4
16	5



### Procedimiento.

1. Preparar solución de sosa cáustica (NaOH) disolviendo tres partes en masa de hidróxido de sodio en 97 partes en masa de agua destilada
2. Obtener una muestra representativa de arena de acuerdo a lo establecido en la NMX-C-030-ONNCCE-2004 y NMX-C-170-ONNCCE-2019.
3. Introducir la muestra seca de agregado fino en la botella de vidrio hasta la marca de 130 cm<sup>3</sup>.
4. Agregar la solución al 3 % de hidróxido de sodio hasta que el volumen del agregado y de la solución se aproxime a 200 cm<sup>3</sup>.
5. después de agitarse vigorosamente, complementar hasta los 200 cm<sup>3</sup>.
6. Tapar la botella y dejar reposar 24 h.
7. Después de este tiempo de reposo, determinar el color de la solución que queda sobre el agregado, de acuerdo con el método B que determina la norma NMX-C-088-ONNCCE-2019 y que se explica a continuación:
  - Para definir con mayor aproximación la coloración del líquido de la muestra de ensayo al final del tiempo de reposo (24 h), se compara con la tabla de colores patrón, o con el juego de vidrios con coloraciones patrón, señalando entre cuales de ellas se encuentra o con cual coincide.
8. Si el color del líquido que está sobre el agregado es más oscuro que el color normalizado No. 3, puede considerarse que el agregado bajo ensayo contiene compuestos orgánicos en cantidades perjudiciales para los morteros y concretos (superiores a 500 ppm. de ácido tánico)  
(NMX-C-088-ONNCCE-2019)

#### 3.1.2.11. Sedimentación en arenas.

El objetivo de este ensayo es el de determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de concreto.



#### Equipo.

- Un frasco graduado con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444ml y la tercera a los 828 ml.
- Una muestra de arena seca de 2 kilogramos aproximadamente.
- Un litro de agua destilada.

#### Procedimiento.

1. Colocar la arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml (figura 3.21), para enseguida llenar de agua el frasco hasta la marca de 828 ml.
2. Tapar el frasco y agitarlo hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.
3. Dejar reposar el frasco durante 24 horas para determinar el nivel del material fino, esto se logra observando si el material fino rebasa o no el nivel de 444 m.

**Nota:** Si el nivel del material fino rebasa la marca de 444ml se reporta el material con exceso de finos. Si el material no rebasa dicha marca, se reporta que su contenido de material fino es aceptable. (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### 3.1.2.12. Material que pasa por la malla No. 200

La prueba consiste en determinar la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla No. 200.

#### Equipo.

- Malla No 200.
- Malla No 16.
- Charola de dimensiones adecuadas para contener el material con agua.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Espátula y parrilla eléctrica.
- Un cristal.



### Procedimiento.

1. Tomar una muestra representativa de 600 gramos de arena y secar a una temperatura de  $383\text{ K} \pm 5\text{ K}$  ( $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ).
2. Una vez seca y fría la muestra colocar en la balanza y pesar, registrando su masa al décimo de gramo y considerando esta medición como masa seca inicial ( $M_i$ ).
3. Colocar el material en un recipiente y agregar agua hasta saturar.
4. Agitar enérgicamente la muestra con agua y verter inmediatamente sobre el juego de mallas (la No 16 arriba y la No 200 abajo).
5. Una vez puesto el material en el juego de mallas seguir agregando agua y agitando hasta que el agua quede completamente clara.
6. Regresar el material retenido en las mallas por medio del lavado.
7. Secar el material completamente con ayuda de la fuente de calor, dejar enfriar y obtener la masa; considerando esta lectura como la masa seca después de lavar o final ( $M_f$ ).

### Cálculos.

$$A = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100$$

*Ecuación 11*

Donde:

A.= Porcentaje de material que pasa la malla No. 200

$M_i$ = Masa seca inicial (g)

$M_f$ = Masa seca después de lavado final (g).

(NMX-C-084-ONNCCE-2017; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### 3.1.2.13. Equivalente de arena.

El equivalente de arenas es la proporción volumétrica de material no plástico (arena y limo) en una muestra de material que pasa por la malla No. 4 (4.75mm). (NMX-C-480-ONNCCE-2014).

La prueba determina las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando



un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos. Es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como sub base, carpeta asfáltica y arena para concreto.

### Equipo

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule.
- Tubo irrigador.
- Un tramo de manguera.
- Un pisón metálico de  $1000 \pm 5$  gramos.
- Cápsulas de  $85 \pm 5$  ml (metálicas).
- Embudo.
- Cronómetro.
- Dos frascos de 3.875 litros.
- Malla No 4.
- Papel filtro No 12.

### Procedimiento.

1. **Preparación de solución.**
2. Tomar una muestra de material de aproximadamente 500 gramos que pasa la malla No. 4, procurando que no se pierdan finos.
3. Llenar la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa. La prueba se realiza por triplicado y se hace un promedio de los resultados.
4. Verter solución de trabajo en las probetas hasta una altura de  $10.16 \text{ cm} \pm 0.25 \text{ cm}$  ( $4" \pm 0.1"$ ) y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material.
5. Dejar reposar  $10 \pm 1$  minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.
6. Colocar el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo, para posteriormente agitar, de forma manual, cada



una de las probetas con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos.

7. Introducir el tubo irrigador, picar el material y con el mismo se baja el material que quedó en las paredes de la probeta;
8. Llenar con solución de trabajo hasta la marca de 15 y dejar reposado por 20 minutos, al término de este tiempo en la escala de la probeta leer el nivel superior de la arcilla en suspensión la cual se denominará como LNS<sub>finos</sub>.
9. Introducir el pisón lentamente en la probeta ajustando hasta que el pisón se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará LNS<sub>arena</sub>.

**Nota:** Existen 3 distintas causas de error que se pueden presentar durante la prueba. La primera es que se agite de forma inapropiada, la segunda es mover las probetas cuando se encuentran en reposo y la tercera causa es introducir el pisón en la probeta a una velocidad excesiva.

#### Cálculos.

$$E. de arena = \frac{LNS_{arena}}{LNS_{finos}} * 100$$

Ecuación 12

Donde:

E. DE ARENAS= Equivalente de arena (%)

LNS<sub>arena</sub>= Nivel superior de la arena (cm).

LNS<sub>finos</sub>= Nivel superior de los finos (cm)

(Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

#### 3.1.2.14. Terrones de arcilla en agregados.

La prueba determina la cantidad de terrones de arcilla aproximada que contiene el agregado y si se acepta el material o no para la elaboración de concreto hidráulico. (NMX-C-071-ONNCCE-2004; Alvarado Alcazar, 2010)



## Equipo

- Balanza
- Recipientes
- Cribas
- Horno de secado

## Procedimiento

1. Tomar el agregado fino y cuartear para obtener una muestra representativa de aproximadamente 1 kilogramo y secar a una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C, teniendo cuidado de no romper los terrones de arcilla.
2. Dejar enfriar la muestra y pasar por la malla No. 16, del retenido tomar una muestra de 100 gramos y anotar como masa inicial (M), pesados al décimo de gramo.
3. Colocar el material en una charola y extiende en una fina capa en la parte inferior.
4. Cubrir la muestra con agua y dejar reposar durante un período de  $24 \pm 4$  horas.
5. Presionar las partículas individualmente entre el dedo pulgar y el índice para tratar de romper los terrones de arcilla que existan.
6. Después de que todo el material ha sido presionado, tamizar la muestra por la malla No. 20.
7. El tamizado se realiza vertiendo agua sobre la muestra mientras se agita manualmente la criba, hasta que todo el material de menor tamaño ha sido eliminado.
8. Remover las partículas retenidas en el tamiz y se secan a temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C.
9. Dejar enfriar el material y determinar su masa (R). (Alvarado Alcazar, 2010; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)



## Cálculo

$$P = \frac{M-R}{M} * 100$$

Ecuación 13

Donde:

P= Porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales.

M= Masa de la muestra de prueba

R= Masa de las partículas retenidas en la criba No. 20.

(NMX-C-071-ONNCCE-2004)

### 3.1.3. Sustituciones de cemento

Las cenizas puzolánicas de Bagazo de Caña y las cenizas de Horno se utilizaron para sustituir en un 10% el cemento de las mezclas de concreto hidráulico de estudio. Para esto fue necesario someterlas a un tratamiento de secado, pulverización y cribado.

#### 3.1.3.1. Secado de la ceniza

El secado de la ceniza de bagazo de caña se hace con la finalidad de eliminar cualquier cantidad de humedad presente en el material.

#### Procedimiento

1. Extender la ceniza sobre grandes charolas o láminas plásticas y secar al sol, procurando cubrir la mayor área posible, para así crear las condiciones idóneas para la pérdida de humedad.
2. Dejar secar por un periodo de 6 a 8 horas continuas.
3. Durante el secado al sol, eliminar cualquier impureza que contamina la ceniza, como son algunas raíces, pequeñas piedras y también se realiza la ruptura de terrones de ceniza formados por la humedad contenida



4. Pasadas las 8 horas meter las cenizas al horno a temperatura de 100°C durante 12 horas.
5. Repetir el proceso anterior hasta secar toda la ceniza disponible.
6. Durante todo el proceso de secado hay que evitar la pérdida de finos, ya que son las partículas de mayor interés como sustituto de cemento en las mezclas.

### 3.1.3.2. Pulverización de las cenizas.

Este procedimiento se realizó con la finalidad de tener un porcentaje más grande de ceniza de Bagazo de Caña disponible para la sustitución del cemento en las mezclas, y de esa forma tener un mayor aprovechamiento del material.

#### Equipo y materiales

- Cenizas de Bagazo de Caña o ceniza de Horno
- Máquina de Los Ángeles.
- 12 bolas de hierro como pulverizadores.
- Pala
- Cinta adhesiva y película plástica.
- Equipo de protección de las vías aéreas.

#### Procedimiento.

1. Introducir la ceniza a la máquina de ensayo de los Ángeles, la cual consiste en un tambor cilíndrico de acero que gira en posición horizontal provisto de una abertura para introducir la muestra que se desea ensayar y un entrepaño para conseguir el volteo del material.
2. Introducir los 12 cuerpos pulverizadores y cerrar de forma hermética (cellar con una película plástica y cinta adhesiva) la máquina, ya que la ceniza tiene una alta facilidad de dispersión.
3. Comenzar el procedimiento de pulverización durante sesiones de 10 minutos por cada 6Kg de ceniza hasta terminar con la ceniza disponible.



4. Concluido el proceso, la ceniza es apta para sustitución de cemento, siendo más fina y homogénea.

### **3.1.3.3. Granulometría de las cenizas posteriores al proceso de pulverización.**

Esta prueba se realiza con la finalidad de separar las cenizas de distintas granulometrías y que de esa forma la sustitución de cemento sea uniforme.

#### **Equipo.**

- Muestras de cenizas.
- Máquina Raf-Tap.
- Malla No 4, No. 50, No. 100, No 200 y charola.

#### **Procedimiento.**

1. Acomodar las mallas de mayor abertura y así progresivamente hasta llegar a la charola.
2. Sellar las juntas entre cada malla con cinta adhesiva, para evitar la pérdida de finos al momento de realizar la prueba.
3. Cribar cada muestra durante 10 minutos.

Para la ceniza de Bagazo de Caña se utilizaron las partículas que pasan la malla ASTM No. 100 (0.150mm) y se retienen en la malla No. 200 (0.075mm); mientras que, para la ceniza de Horno producto de elaboración de ladrillo se utilizó aquella que pasaba la malla No 200 (0.075mm) para la elaboración de las mezclas.

## **3.1.4. Adiciones**

### **3.1.4.1. Fluidificante**

El procedimiento empleado para la incorporación del aditivo plastificante a las mezclas con relación  $a/c=0.45$  fue el siguiente:



### Equipo.

- CRISOTAN R-5 líquido.
- Probetas graduadas.
- Agitador.
- Agua de mezclado.
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.

### Procedimiento

1. Pesar la cantidad requerida en gramos, para cada mezcla, de porcentaje de aditivo CRISOTAN R-5 líquido.
2. Llenar de agua la probeta con la cantidad referida por el proporcionamiento de cada una de las mezclas a realizar.
3. Incorporar a la probeta la cantidad de aditivo y con ayuda del agitador mezclar hasta incorporar en el agua, obteniendo un color café-oscuro.
4. Dejar reposar el CRISOTAN R-5, durante un tiempo de 30 minutos. Pasado este tiempo incorporar a la mezcla de concreto para así realizar el colado de los especímenes.

#### 3.1.4.2. Agua.

De acuerdo a la norma NMX-C-122-ONNCCE-2019, el agua a utilizar debe ser potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida.

El agua potable del laboratorio cuenta con un reporte de calidad del agua, realizado en el año 2014, por el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, quienes expidieron los resultados conforme a la normativa mexicana NMX-C-122-ONNCCE, 2004.



## 3.2. Diseño y elaboración de mezclas por el método del ACI

Se realizó el proporcionamiento de las mezclas de concreto hidráulico con el método del ACI para la relación  $a/c=0.45$  y la relación  $a/c=0.65$ , también se tomó en cuenta que unas mezclas llevarían una sustitución del 50% de agregado reciclado respecto al agregado triturado.

### 3.2.1. Diseño ACI

El objetivo del diseño es cuantificar y determinar la combinación más de los ingredientes que componen el concreto hidráulico para satisfacer los requerimientos técnicos específicos identificando las proporciones de agregados finos y gruesos, así como la relación agua-cemento. (Muciño Vélez & Santa Ana Lozada, 2017)

Las propiedades de los materiales que conforman la mezcla son recopiladas en una tabla como la que se muestra a continuación.

Tabla 18.. Resumen de las propiedades de los materiales

Material	M.V.S.S.	M.V.S.V.	Densidad	Absorción	Módulo de finura (M.F.)	Tamaño máximo (T.M.)
Unidades	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	%	-	in
Arena						
Grava						
Cemento						

También debe especificarse la resistencia del concreto que se desea alcanzar, es decir, el  $f'c$  expresado en Kg/cm<sup>2</sup>, así como el revenimiento de diseño.

#### Procedimiento.

**Paso 1. Selección del revenimiento.** De no especificarse el revenimiento, puede seleccionarse un valor con ayuda de la siguiente tabla de acuerdo al tipo de obra que se desee construir.



Tabla 19. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción (ACI)

Tipos de construcción	Revenimiento	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas, cajones de cimentación y muros de subestructura sencillos	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

**Paso 2. Selección del tamaño máximo nominal del agregado.** De acuerdo al ACI-318 el tamaño máximo del agregado no debe exceder:

- $1/5$  parte de la separación menor entre los lados de la cimbra
- $1/3$  del espesor de la losa.
- $3/4$  del espacio libre entre varillas, alambres de refuerzo individuales, paquetes de varilla, cables individuales, cables en paquete, o ductos.

Estas limitaciones pueden ser omitidas si la trabajabilidad y los métodos de compactación permiten colocar el concreto sin cavidades o huecos.

De acuerdo con el ACI-304, si el concreto se coloca mediante bombeo, el tamaño máximo del agregado debe limitarse a:

- $1/3$  del diámetro interior de la tubería, para agregados triturados angulosos.
- $2/5$  del diámetro interior de la tubería, para agregados redondeados.  
(Muciño Vélez & Santa Ana Lozada, 2017)

En este trabajo no fue necesario recurrir a este paso, ya que se utilizó el tamaño máximo obtenido tanto del agregado triturado como del agregado reciclado producto de demolición.



**Paso 3. Cantidad de agua de mezclado y contenido de aire.** La cantidad de agua por volumen unitario de concreto requerida para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo nominal, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido.

Tabla 20. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado (ACI)

Revenimiento, cm	Agua, Kg/m <sup>3</sup> concreto para TMG, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
<b>Concreto sin aire incluido</b>								
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
<b>Concreto con aire incluido</b>								
De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
<b>Promedio recomendado de aire por incluir por exposición</b>								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

**Paso 4. Selección de la relación agua/cemento.** La relación agua/cemento será una de las características más importantes, pues al ser lo más baja posible nos brindará un concreto de mayor durabilidad, a la vez debe ser aquella que permita a la mezcla tener una trabajabilidad adecuada. La resistencia media, que es mayor que el  $f'c$  se llama  $f'cr$ , y es la resistencia requerida en el diseño de la mezcla. El  $f'cr$  se obtiene de sumar a la resistencia de proyecto  $f'c$  la desviación estándar de la resistencia del concreto. Este valor se define de acuerdo al procedimiento de fabricación de la mezcla.



Tabla 21. (a) Correspondencia entre la relación agua/ cemento y la resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 días Kg/cm <sup>2</sup>	Relación agua/ cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Tabla 22. (b) Relaciones agua/cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas

Tipo de estructura	Estructuras continuas o frecuentemente mojadas y expuestas a congelamiento y deshielo	Estructuras expuestas al agua de mar o a sulfatos
Secciones esbeltas y secciones con menos de 3cm	0.45	0.4
Todas las demás estructuras	0.5	0.45

**Paso 5. Contenido de cemento.** La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el paso 3 y 4. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación a/c. (ACI Committee 201, 2008)

**Paso 6. Estimación del contenido de grava.** Se puede ver que, para una trabajabilidad igual, el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto depende sólo de su tamaño máximo nominal y del módulo de finura del agregado fino. Este volumen se convierte a masa seca del agregado grueso requerido en un metro cúbico de concreto, multiplicándolo por la masa unitaria de varillado en seco por metro cúbico de agregado grueso. (ACI Committee 201, 2008)



Tabla 23. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo de agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5 (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.8	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

\*Volúmenes seleccionados a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para la construcción reforzada común.

\*Para concretos menos trabajables, como los requisitos de construcción de pavimentos de concreto, se pueden incrementar en un 10% aproximadamente.

\*Para colados con bombas o áreas congestionadas, se puede reducir el volumen de agregado hasta en un 10%

**Paso 7. Estimación del contenido de arena.** Se lleva a cabo mediante el método del volumen absoluto, el cual inicia con el cálculo de la masa de la grava y el volumen de la grava, haciendo uso de la densidad de la misma.

El método del volumen absoluto implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes. En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se restan del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su masa dividida entre la densidad de ese material (siendo esta el producto de la masa unitaria del agua y de la gravedad específica del material).

**Paso 8. Ajustes por humedad de los agregados.** Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para 1 m<sup>3</sup> de mezcla se realizan



las correcciones por humedad del agregado, esta corrección consiste en restar al porcentaje de la humedad actual el porcentaje de la humedad de absorción del material (porcentaje de humedad actual – porcentaje de absorción). Por lo tanto, a los materiales pétreos, al considerarse superficialmente secos y saturados se les debe restar el porcentaje de absorción correspondiente. (ACI Committee 201, 2008)

**Paso 9. Ajustes por sustitución de cemento.** Las cenizas de sustitución, en este caso la Ceniza de Bagazo de Caña y la Ceniza de Horno sustituyen el 10% en masa del cemento. Por lo que, simplemente se calcula el 10% de la masa de cemento y esta se resta de la cantidad de cemento tanto en volumen del concreto como en la masa del concreto y se agrega ese 10% con el volumen de ceniza y la masa de ceniza.

Tabla 24. Cantidades de material a utilizar resultantes del proporcionamiento ACI.

M.F.=2.71	Proporcionamiento general en m <sup>3</sup>							
	Grava Triturada				Grava reciclada			
	a/c= 0.45		a/c= 0.65		a/c= 0.45		a/c= 0.65	
Material	Volumen (L)	Masa (Kg)	Volumen (L)	Masa (Kg)	Volumen (L)	Masa (Kg)	Volumen (L)	Masa (Kg)
Cemento	155	480	107	332	147	456	102	315
Grava	330	871	355	937	343	741	367	794
Arena	274	659	297	712	285	684	306	734
Agua	216	216	216	216	205	205	205	205
Aire	25	0	25	0	20	0	20	0
Total	1000	2225	1000	2198	1000	2086	1000	2048

En total se produjeron catorce mezclas distintas (Tabla 25)

Tabla 25. Lista de Mezclas elaboradas con descripción de partes.

Mezcla	Grava	Relación	Nomenclatura	
Control	CCA	0.45	TT 045	Testigo con Agregado Triturado convencional
Control	CCA	0.45	TT 045 F	Testigo con Agregado triturado convencional y fluidificante
Control	RCA	0.45	TR 045 F	Testigo con Agregado Reciclado con fluidificante



Mezcla	Grava	Relación	Nomenclatura	
Control	CCA	0.65	TT 065	Testigo con Agregado Triturado convencional
Control	CCA	0.65	TT 065 F	Testigo con Agregado Triturado convencional y fluidificante
Control	RCA	0.65	TR 065 F	Testigo con Agregado Reciclado y fluidificante
ABMP	CCA	0.45	CH 045 T	Sustituto de Ceniza de Horno con Agregado Triturado convencional y Fluidificante
ABMP	CCA	0.65	CH 065 T	Sustituto de Ceniza de Horno con Agregado Triturado convencional
ABMP	RCA	0.45	CH 045 R	Sustituto de Ceniza de Horno con Reciclado y Fluidificante
ABMP	RCA	0.65	CH 065 R	Sustituto de Ceniza de Horno con Reciclado
SCBA	CCA	0.45	CC 045 T	Sustitución de Ceniza de bagazo de Caña con Agregado Triturado convencional y fluidificante
SCBA	CCA	0.65	CC 065 T	Sustitución de Ceniza de bagazo de Caña con Agregado Triturado convencional y fluidificante
SCBA	RCA	0.45	CC 045 R	Sustitución de Ceniza de bagazo de Caña con Agregado Reciclado y fluidificante
SCBA	RCA	0.65	CC 065 R	Sustitución de Ceniza de bagazo de Caña con Agregado Reciclado y fluidificante

De cada tipo de mezcla, se elaboraron:

- Cilindros de 10 cm de diámetro por 20cm de altura.
- Prismas de 6x6x26cm.
- Especímenes rectangulares (paletas) de 20x10x5xm de concreto con acero de refuerzo. En cada una de las probetas se utilizaron 2 varillas corrugadas de 3/8” con una longitud de 15cm aproximadamente (sobresalen del concreto por 2 cm) y 1 grafito entre ambas varillas que funciona como electrodo de referencia estable.

Debido a que las cenizas puzolánicas son sustituciones, se realizaron distintos ajustes al proporcionamiento inicial, por lo que, a continuación, se muestra el proporcionamiento de cada mezcla y sus propiedades.



### 3.2.2. Mezclas control o testigo

Tabla 26. Mezclas testigo. Propiedades

Mezclas control o testigo										
Tipo de Mezcla			Fluidificante 8cm <sup>3</sup> /kg	Desperdicio (%)	Revenimiento	Peso de material (Kg) para 1m <sup>3</sup>				
						Cemento	Grava	Arena	Agua	Total
Control	CCA	0.65	NO	15	11	382	1060	790	294	2526
Control	CCA	0.45	NO	15	13	552	985	730	298	2566
Control	CCA	0.65	SI	15	21	382	1060	790	294	2526
Control	CCA	0.45	SI	15	21	552	985	730	298	2566
Control	RCA	0.65	SI	15	S/R	363	858	815	320	2356
Control	RCA	0.45	SI	15	10	552	858	815	320	2545

### 3.2.3. Mezclas con adición de Ceniza de Horno (ABMP)

Tabla 27. Propiedades y Mezclas con 10% de sustitución de Ceniza de horno

Mezclas con sustitución de CENIZA DE HORNO (10% sustitución)											
Tipo de Mezcla			Fluidificante 8cm <sup>3</sup> /kg	Desperdicio (%)	Revenimiento (cm)	Peso de material (Kg) para 1m <sup>3</sup>					
						Cemento	Grava	Arena	Agua	Ceniza	Total
ABMP	CCA	0.65	NO	15	18	345	1060	790	294	19	2507
ABMP	CCA	0.45	SI	15	21	524	985	730	290	28	2558
ABMP	RCA	0.65	SI	15	s/r	345	858	815	320	19	2356
ABMP	RCA	0.45	SI	15	15	524	985	730	290	28	2558

### 3.2.4. Mezclas elaboradas con Ceniza de Bagazo de Caña (SCBA)

Tabla 28. Propiedades y Mezclas con sustitución al 10% de Ceniza de Bagazo de Caña.

Mezclas con sustitución de CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA CC (10% sustitución)											
Tipo de Mezcla			Fluidificante 8cm <sup>3</sup> /kg	Desperdicio (%)	Revenimiento (cm)	Peso de material (Kg) para 1m <sup>3</sup>					
						Cemento	Grava	Arena	Agua	Ceniza	Total
SCBA	CCA	0.65	SI	15	15	345	1060	790	294	37	2526
SCBA	CCA	0.45	SI	15	13	498	985	730	298	56	2567
SCBA	RCA	0.65	SI	15	21	345	1060	790	294	36	2524
SCBA	RCA	0.45	SI	15	11	498	858	815	320	56	2547



### **3.3. Pruebas al concreto hidráulico**

#### **3.3.1. Revenimiento del concreto de Cemento Hidráulico**

El Revenimiento es una medida de la consistencia del concreto fresco en término de la disminución de altura. Este método de prueba determina el revenimiento del concreto ya sea en el laboratorio o en campo.

##### **Equipo**

- Cono de revenimiento
- Charola
- Cucharón
- Varilla punta de bala de 5/8”
- Pala
- Cinta métrica

##### **Procedimiento**

1. Obtener una muestra representativa en una charola, esta muestra debe remezclarse con una pala o cucharón para garantizar uniformidad en la mezcla y se procede a hacer la prueba inmediatamente.
2. Humedecer el molde de revenimiento y el cucharón.
3. Colocar el molde en una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente y se sujeta colocando los pies en las orejas que tiene especialmente para ello.
4. Verter el concreto usando el cucharón, se llena aproximadamente el molde con 3 capas aproximadamente de igual volumen, se compacta cada capa con 25 golpes de la varilla introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después, con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro.
5. Se compacta la segunda capa y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa se coloca un ligero excedente



de concreto por encima del borde superior del molde, antes de empezar la compactación. Si a consecuencia de la compactación, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, a la décima y/o vigésima penetración, se agrega concreto en exceso para mantener su nivel por encima del borde del molde, todo el tiempo.

6. Terminada la compactación de la última capa, enrasar el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Limpiar la superficie exterior de la base de asiento e inmediatamente se levanta el molde con cuidado en dirección vertical.
7. La operación para levantar completamente el molde de los 30 cm de su altura, debe hacerse en 5 s  $\pm$  2 s, alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación completa desde el comienzo del llenado hasta que se levante el molde, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min.

Medir inmediatamente el revenimiento, determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia de alturas en el centro desplazado de la superficie superior del espécimen. (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011; NMX-C-156-ONNCCE-2020)

Tabla 29. Valor nominal del revenimiento y tolerancias. (NMX-C-156-ONNCCE-2020)

Revenimiento Nominal (mm)	Tolerancias (mm)
Menor de 50	$\pm 15$
De 50 a 100	$\pm 25$
Mayor de 100	$\pm 35$

### **3.3.2. Elaboración de especímenes de prueba en el laboratorio**

Este método establece los requisitos estandarizados para la preparación de especímenes de concreto hidráulico utilizado para las distintas pruebas realizadas en este trabajo de investigación. (Alvarado Alcazar, 2010)



### Equipo y materiales

- Desmoldante no reactivo (aceite mineral emulsificado).
- Pala., cucharón, carretilla y charolas.
- Mazo con cabeza de hule.
- Película plástica para proteger la muestra.
- Varilla punta de bala y Enrasador.
- Moldes metálicos (Cilindros, vigas y paletas):
  - Molde cilíndrico de 10cm de diámetro y 20 cm de altura.
  - Molde prismático de 6cm de alto, 6cm de ancho y 26cm de largo.
  - Moldes de paletas. 25cm de alto, 5cm de ancho y 15cm de largo.

### Procedimiento

1. Elaborar los especímenes en el lugar donde se almacenarán las primeras 24 horas.
2. Colocar los moldes sobre una superficie rígida, plana y horizontal, que no esté sujeta a vibraciones u otras perturbaciones.
3. Para evitar la segregación, es necesario remezclar el concreto en el recipiente de muestreo antes de la elaboración de los especímenes.
4. Con el cucharón tomar concreto del recipiente de muestreo y mover alrededor del borde superior del molde asegurando una distribución uniforme y reducir la segregación del agregado grueso.
5. Distribuir el concreto colocado, empleando la varilla de compactación. Al colocar la última capa procurar que la cantidad de concreto llene el molde rebosándolo después de su compactación.
6. Elaborar los especímenes de llenado y compactación según lo indica la siguiente tabla.

Tamaño de espécimen (mm)	Modo de compactación	Número de capas de aproximadamente igual espesor.
<b>Cilindros (diámetro en mm)</b>		
75 a 100	Varillado	2
150	Varillado	3



225	Varillado	4
Hasta 225	Vibrado	2
<b>Prismas (profundidad en mm)</b>		
Hasta 200	Varillado	2
Arriba de 200	Varillado	3 o más
Hasta 200	Vibrado	1
Arriba de 200	Vibrado	2 o más

Tabla 30. Número de capas requeridas para los especímenes. (NMX-C-159-ONNCCE-2016)

7. Varillar cada capa con su extremo redondo, empelando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificados en la siguiente tabla.

Tabla 31 Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleadas para moldear los especímenes cilíndricos de ensayo (NMX-C-159-ONNCCE-2016)

<b>Cilindros</b>		
Diámetro de cilindro (mm)	Diámetro de varilla, mm	Número de penetraciones por capa
75<150	10±2	25
150	16±2	250
200	16±2	50
250	16±2	75
<b>Prismas</b>		
Área de la superficie superior del espécimen, cm <sup>2</sup>	Diámetro de varilla, mm	Número de penetraciones por capa
100 o menos	10±2	25
165 a 310	10±2	Una por cada 7cm <sup>2</sup> de superficie
320 o más	10±2	Una por cada 14cm <sup>2</sup> de superficie



8. Después de la compactación, se termina la superficie superior enrasándola con un Enrasador de metal. (NMX-C-159-ONNCCE-2016; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011; Alvarado Alcazar, 2010)



Ilustración 20. Especímenes prismáticos y cilíndricos que se someterán a pruebas de durabilidad (García Romero, 2021)



Ilustración 21. Especímenes cilíndricos de 10x20cm. (García Romero, 2021)



Ilustración 22. Especímenes paleta de 25x5x15cm (García Romero, 2021)



Ilustración 23. Especímenes prismáticos de 6x6x26cm. (García Romero, 2021)

### 3.3.3. Curado de especímenes de prueba en el laboratorio

Esta prueba comienza inmediatamente después de terminar la elaboración de los especímenes.

#### Procedimiento.

1. Justo después de terminar el acabado de la superficie con un Enrasador, tapan el espécimen con la película plástica, para evitar la pérdida de agua por evaporación en los especímenes sin fraguar.
2. Proteger los especímenes de cambios bruscos de temperatura y humedad el tiempo que permanezcan en el sitio de elaboración.
3. Descimbrar los especímenes entre 20h y 48h después de su elaboración.
4. A menos que en otro método se especifique, todos los especímenes deben ser curados en humedad a temperaturas de  $23^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$  durante las primeras 24 horas después del descimbrado, después de ese tiempo deben mantenerse a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ , con una humedad relativa de 95 % mínima, hasta el momento de la prueba.



El almacenaje durante las primeras 48 h debe ser en un sitio libre de vibraciones. Con relación a los especímenes extraídos de los moldes, el curado húmedo significa que los especímenes de prueba pueden mantenerse con agua libre en su superficie en todo tiempo. Esta condición se logra por inmersión en agua saturada con cal, o por almacenamiento en un cuarto húmedo.



Ilustración 24. Especímenes cilíndricos y prismáticos en pila de curado. (García Romero, 2021)

### **3.3.4. Cabeceo de Especímenes cilíndricos de concreto hidráulico**

El cabeceo es un procedimiento que prepara las bases de los especímenes de forma que se obtiene una superficie plana en los extremos de los cilindros de concreto, este procedimiento se hace con ayuda de materiales adheribles o cemento puro a los especímenes cilíndricos de concreto recién elaborados, así como con mortero de azufre a los especímenes ya endurecidos cuando la superficie final no se ajuste a los requisitos de planicidad y perpendicularidad de las normas aplicables. (Alvarado Alcazar, 2010; NMX-C-109-ONNCCE-2013)

#### **Equipo.**

- Compuesto para cabeceo (mortero de azufre).



- Platos metálicos para cabeceo
- Alineador para cabeceo de especímenes cilíndricos.
- Recipiente para fundir el azufre.
- Estufa de gas.
- Aceite mineral, paño.

### Procedimiento

1. Preparar el mortero de azufre para su empleo calentándolo a  $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ), colocando la cantidad necesaria de mortero de azufre en el recipiente para fundir (verificando que el material reusado no tenga más de 10 usos) garantizando se cumpla lo especificado por la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013 en la tabla 33
2. Para el cabeceo de especímenes de concreto de resistencia mayor que  $350 \text{ Kg/cm}^2$ , antes del cabeceo de los especímenes, se debe comprobar que el mortero tiene una resistencia de por lo menos la resistencia del concreto.
3. Mantener alejado de cualquier humedad el mortero de azufre y a su vez, verificar que se encuentre seco al momento de colocarlo en el recipiente de fundido, ya que la humedad puede provocar espuma.
4. El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser calentados ligeramente antes de ser empleados para disminuir la velocidad de endurecimiento y permitir la formación de capas delgadas. Inmediatamente antes de vaciar cada capa, se aceita ligeramente el plato de cabeceo y se agita el mortero de azufre fundido.
5. Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben estar suficientemente secas en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma de diámetro mayor de 6 mm.
6. Para asegurarse que la capa se ha adherido a la superficie del espécimen, la base de este no debe ser aceitada antes de la aplicación de la capa.



7. Los especímenes curados por vía húmeda deben ser mantenidos en condiciones húmedas durante el tiempo transcurrido entre el terminado del cabeceo y el momento de la prueba, regresándolos al almacenamiento húmedo o protegiéndolos con una manta o material similar húmedos para evitar la evaporación.
8. Los especímenes cabeceados no se ensayarán hasta que el mortero de azufre haya desarrollado la resistencia requerida. (Alvarado Alcazar, 2010; NMX-C-109-ONNCCE-2013; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

Tabla 32. Resistencia a la compresión y espesor máximo del compuesto para cabeceo. (NMX-C-109-ONNCCE-2013)

Resistencia del concreto, en MPA (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia mínima del compuesto para cabeceo, en MPA (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Espesor promedio de cada capa de cabeceo, en mm	Espesor máximo de cada capa de cabeceo en cualquier punto de oquedad en la misma, en mm
3.5 a 50 (35 a 500)	35 (350) la del concreto, cualquiera que sea mayor.	6	8
>50 (>500)	No menor que la resistencia del concreto	3	5

### 3.4. Pruebas no destructivas

#### 3.4.1. Resistividad eléctrica

La Resistividad eléctrica es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del hormigón y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Es función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/ cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. (CYTED-DURAR, 1998)



En este caso, se tomó la resistividad eléctrica real, que es la resistividad medida sobre el concreto saturado con agua. (NMX-C-514-ONNCCE-2016).

### Especímenes.

Las pruebas a edades tempranas, se realizaron en especímenes cilíndricos con diámetro de 10cm y una altura de 20cm, las cuales se mantuvieron en curado hasta el momento de la prueba. Se llevaron a edades de 28, 45 y 90 días. Las pruebas a edades tardías (1500 días) se realizaron con los especímenes prismáticos de 6x6x26cm, los cuales se mantuvieron en curado hasta el momento de la prueba.



Ilustración 25. Especímenes prismáticos de 6x6x26cm de la mezcla Testigo con agregado reciclado con una relación a/c=0.65 (García Romero, 2021)



Ilustración 26. Especímenes prismáticos de 6x6x26cm de la mezcla con sustituto de Ceniza de Bagazo de Caña, con agregado triturado y la relación a/c=0.45 (García Romero, 2021)

### Equipo.

1. Resistómetro, marca Nilsson, capas de medir resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos.
2. Placas metálicas.
3. Almohadillas absorbentes de agua.
4. Vernier y cinta métrica para medir dimensiones.



## 5. Termómetro.



Ilustración 27. Equipo necesario para realizar prueba de resistividad eléctrica. (García Romero, Daniela)

### Procedimiento

1. Enumerar las probetas y se procede a determinar dimensiones del espécimen, para el caso de los cilindros determinar el diámetro de cada cara y su altura, mientras que, para los prismas tomar su altura, ancho y longitud en cm.
2. Tomar la temperatura de cada espécimen después de sacarlos del agua hasta que sea constante.
3. Humedecer las almohadillas con agua y mantener de esa forma durante el resto de la prueba.
4. Conectar las placas al resistómetro y revisar la conexión con las terminales de corriente y voltaje.
5. Colocar el espécimen (saturado de agua y superficialmente seco) entre las placas metálicas con la almohadilla saturada de agua.
6. Se somete el prisma de concreto a una corriente dada ( $I$ ) y se registra un voltaje ( $E$ ).



“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”



Ilustración 28. Resistómetro marca Nilsson.

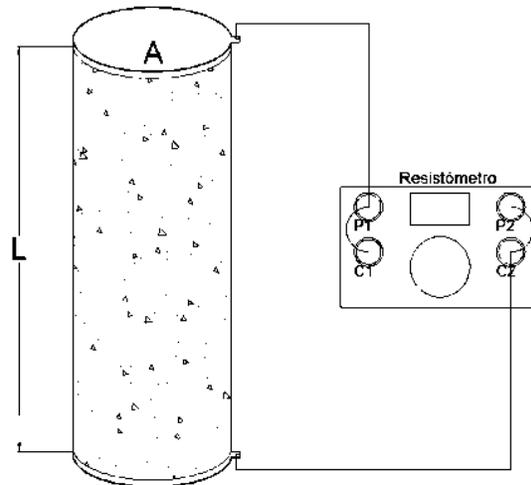


Ilustración 29. Montaje del espécimen para el método directo (NMX-C-514-ONNCCE-2016)



Ilustración 30. Enumeración de las probetas prismáticas. (García Romero, 2021)



Ilustración 31. Medición de espesor de las probetas prismáticas que se someterán a resistividad eléctrica. (García Romero, 2021)



Ilustración 32. Toma de temperatura hasta que sea constante de espécimen prismático (García Romero, 2021)



Ilustración 33. Colocación del espécimen con sustitución de Ceniza de Horno, agregado triturado y relación  $a/c=0.65$ . (García Romero, 2021)



Ilustración 34. Realización del método directo de la prueba de durabilidad de resistividad eléctrica con el aparato de Nilsson (García Romero, 2021)

### Cálculos

La resistencia eléctrica ( $R_e$ ) está dada por la siguiente ecuación

$$R_e = \frac{E}{I} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$R_e$ = Resistencia eléctrica (Kohm).

$E$ = Tensión o diferencia de potencial eléctrico, volt, con aproximación de una décima.

$I$ = Corriente aplicada, amperio, con aproximación de una décima.

Para obtener el valor de la resistividad eléctrica ( $\rho$ ) se debe multiplicar la resistencia eléctrica por un factor de corriente de celda ( $k$ ), la cual es la relación entre el área de la sección transversal del espécimen y la longitud ( $L$ ) del mismo.

$$k = \left[ \frac{A}{L} \right] \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\rho = R_e * k \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:



$P$ = Resistividad eléctrica (Kohm-cm)

$K$ = Constante de celda en cm o m

$R_e$ = Resistencia eléctrica (Kohm).

$A$ = Área transversal del espécimen (cm<sup>2</sup>)

$L$ = Longitud del espécimen (cm).

### ***3.4.2. Prueba de Fagerlund (Absorción capilar en concreto hidráulico)***

Esta prueba sirve para determinar la absorción capilar (sortividad) y la porosidad de morteros y hormigones como una medida de su compacidad. (CYTED-DURAR, 1998)

Como **porosidad** del hormigón se consideran los espacios vacíos que quedan en la masa de hormigones y morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en (CYTED-DURAR, 1998):

- **Poros de gel.**
- **Poros capilares.**
- **Poros de aire.**

La absorción capilar es el proceso de penetración de agua en el concreto, determinado por las características de capilaridad de la matriz de concreto. Definido como masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua en estado líquido. Representa la porosidad efectiva accesible al agua y por lo tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente. (NMX-C-504-ONNCCE-2015).



La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de tres coeficientes: Resistencia a la penetración del agua ( $m$ ), Coeficiente de absorción capilar ( $K$ ) y Porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ) (CYTED-DURAR, 1998)

### Especímenes

Cilindros de  $100\text{mm} \pm 6\text{mm}$  de diámetro, con un espesor de  $50\text{mm} \pm 3\text{mm}$ , se obtuvieron 3 muestras en total de cada cilindro (200cm de altura) cortado.

Se cortó 1 cilindro de cada una de las 13 mezclas, por lo que, en total se obtuvieron 39 especímenes (exceptuando la mezcla de Ceniza de Bagazo de Caña con agregado triturado y relación  $a/c=0.45$  ya que no se encontraron especímenes de dicha mezcla).

### Equipo y materiales.

- Vernier
- Cubeta de fondo plano y con tapa
- Esponja
- Estufa
- Resina epoxi o parafina
- Balanza con aproximación de 0.01g
- Cortadora de disco con enfriador de agua.
- Cronómetro

### Procedimiento

1. Cortar cada cilindro con ayuda de la cortadora, en total se obtienen 3 rodajas con un espesor de 5cm y un diámetro de 10cm.
2. Colocar los especímenes en el horno a una temperatura de  $50^\circ\text{C}$  durante 3 días.
3. Pasados los 3 días de acondicionamiento colocar los especímenes de forma que haya flujo libre de aire alrededor de los especímenes, por lo cual, se debe mantener una separación de 5cm en todas las direcciones



entre ellos, asegurando evitar el contacto con las paredes del recipiente, almacenar así por 15 días.

4. Pasados 15 días registrar la masa de cada espécimen con una precisión de 0.01g.
5. Medir 4 diámetros con precisión de 0.1mm en la superficie del espécimen que se expone al agua.
6. Sellar la superficie lateral de cada espécimen utilizando cera derretida aplicada con una brocha, de forma que se cubran todos los poros. La cara superior que no estará en contacto con el agua se sella con una bolsa de plástico detenida con una banda elástica.
7. Medir la masa del espécimen sellado con una precisión de 0.01g y se registra como la masa inicial ( $m_0$ ).
8. En el recipiente plástico colocar la esponja y llenar con agua de forma que el nivel de esta sea de  $3 \pm 1$ mm por encima de la esponja, este nivel debe mantenerse durante todo el periodo de prueba.
9. Iniciar la medida del tiempo con el cronómetro e inmediatamente colocar la superficie de ensayo del espécimen sobre la esponja, anotar hora y fecha.
10. De acuerdo a la norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 se registran las masas en los intervalos siguientes:

Tabla 33. Tiempos y tolerancias para la toma de lecturas o mediciones (NMX-C-504-ONNCCE-2015)

Tiempo	60 s	5min	10 min	20 min	30 min	60 min	Una medición cada hora desde la hora 2 hasta la hora 6	1 medición por día, del Día 1 hasta el día 3	1 medición por día, del día 4 al día 7	1 medición final al menos 24 horas después del día 7 y antes del día 9
							2 h 3 h 4 h 5 h 6 h	24 h 48 h 72 h	96 h 120 h 144 h 168 h	192 h
Tolerancia	2 s	10 s	2 min	2 min	2 min	2 min	5 min	2 h	2 h	2 h



**Nota:** para el cálculo y expresión de resultados las unidades de tiempo deben expresarse en segundos.



para prueba de Fagerlund (García Romero, 2021)



Ilustración 36. Cortado de cilindros para prueba de absorción con cortadora de disco con enfriador de agua (García Romero, 2021)



Ilustración 37. Horno para secado a 50°C.



Ilustración 38. Masa seca después de reposo de 15 días de cilindro de mezcla Testigo con agregado triturado y una relación a/c=0.45



Ilustración 39. Medición de 4 diámetros con Vernier.



Ilustración 40. Sellado con parafina en la superficie lateral de cada espécimen



Ilustración 41. Especímenes cubiertos con parafina para el sellado.



Ilustración 42. Toma de masa de rodajas de concreto con sellado de parafina, plástico y liga elástica.



Ilustración 43. El recipiente plástico con esponja y agua que cubre 3mm de la muestra colocada con la superficie de ensayo del espécimen sobre la esponja



Ilustración 44. Masa de Testigo con agregado triturado y relación a/c=0.65 a los 60s de inmersión

### Cálculos

El índice de absorción (I) es:

$$I = \frac{m_t - m_0}{a * d}$$

Ecuación 17

Donde:

I= índice de absorción, en (mm)

$m_t$ = Masa, en el tiempo t (g)

$m_0$ = Masa, en el tiempo cero (g)

a= zona expuesta de la muestra (mm<sup>2</sup>)

d= densidad del agua (g/mm<sup>3</sup>)

**Nota:** La densidad del agua a la temperatura de 25±2°C tendrá un valor de 0.001g/ mm<sup>3</sup>. (NMX-C-504-ONNCCE-2015)

Los coeficientes se calculan en base a las siguientes ecuaciones:



$$m = \frac{t}{z^2} (s/m^2)$$

Ecuación 18

Donde:

m= Resistencia a la penetración del agua (s/m<sup>2</sup>)

z= profundidad de penetración del agua.

t= tiempo de penetración del agua.

$$k = \frac{(m_t - m_0)/A}{\sqrt{t}} (kg / m^2 s^{1/2})$$

Ecuación 19

Donde:

k= Coeficiente de absorción capilar.

m<sub>t</sub>= Masa, en el tiempo t (Kg)

m<sub>0</sub>= Masa, en el tiempo cero (Kg)

A= Área de contacto de la muestra(m<sup>2</sup>)

t= tiempo (s)

$$\epsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%)$$

Ecuación 20

Donde:

ε<sub>e</sub>= Porosidad efectiva.

Con la anterior información la Sorción Capilar o Sortividad, se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} (mm / h^{1/2}) o (m / s^{1/2})$$

Ecuación 21

La sortividad es una característica el concreto hidráulico endurecido que indica su capacidad de absorción de agua a nivel capilar. Se define como el incremento de masa en un espécimen en función del tiempo, cuando es expuesto a una fuente de agua en forma unidireccional. (CYTED-DURAR, 1998)



## Ejemplo de datos sobre la absorción y resultados del análisis de regresión

Datos:

Espécimen: Concreto: TT 1  
Fecha de ensayo: Diámetro 99.7 mm  
Relación a/c= 0.65 Área (A<sub>o</sub>): 7807 mm<sup>2</sup>  
Altura (z): 46.8 mm

Tabla 34. Datos de absorción del espécimen “control CCA” con Fluidificante.

Tiempo (t)		$\sqrt{t}$	Masa (m)	$\Delta m$	l
min	s	s <sup>1/2</sup>	g	g	mm
0	0		777	0.000	0.00
1	60	8	779	2.170	0.28
5	300	17	779	2.810	0.36
10	600	24	780	3.090	0.40
20	1200	35	780	3.170	0.41
30	1800	42	781	3.960	0.51
60	3600	60	781	4.700	0.60
120	7200	85	782	5.430	0.70
180	10800	104	783	6.360	0.81
240	14400	120	784	7.220	0.92
300	18000	134	784	7.880	1.01
360	21600	147	785	8.720	1.12
1440	86400	294	791	14.100	1.81
2880	172800	416	795	17.990	2.30
4320	259200	509	797	20.210	2.59
5760	345600	588	798	21.800	2.79
7200	432000	657			
8640	518400	720	800	23.650	3.03
10080	604800	778	801	24.850	3.18
11520	691200	831			

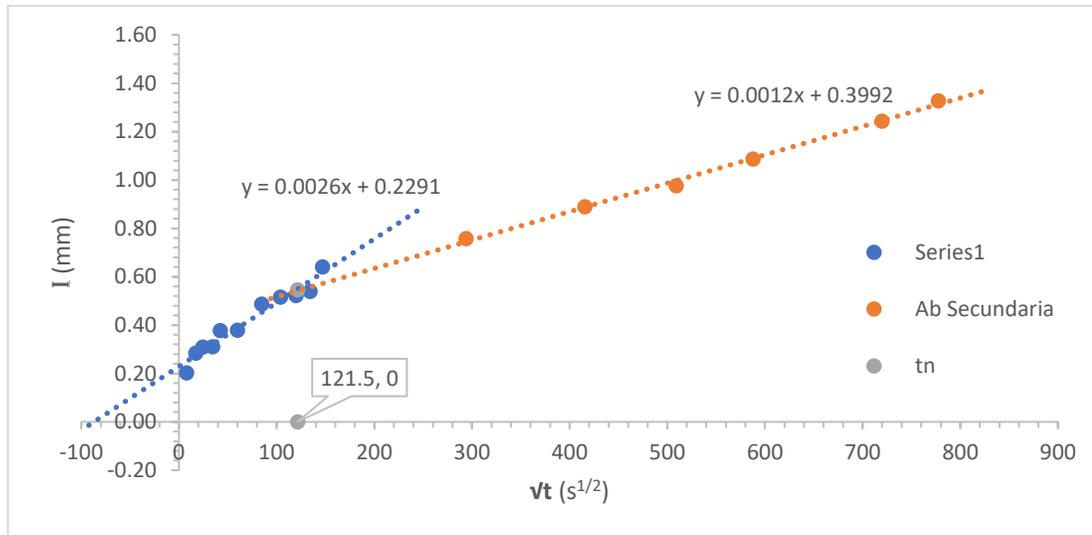


Gráfico 1.de mezcla “Control CCA con fluidificante” (García Romero, 2021)

Tabla 35. Resumen de resultados de los cálculos de la prueba de Fagerlund para “Control CCA con fluidificante”. (García Romero, 2021)

<b>I=</b>	0.0026 mm/s <sup>^(1/2)</sup>
<b>tn=</b>	14762.25 s
<b>k1=</b>	7.04E-04 kg/((m <sup>^2</sup> )*(s <sup>^(1/2)</sup> ))
<b>m=</b>	6.46E+06 s/m <sup>^2</sup>
<b>ε<sub>e</sub>(%)=</b>	0.18
<b>S=</b>	3.93E-04 m/s <sup>^2</sup>

### 3.4.3.Frecuencia de resonancia

La frecuencia natural de vibración es una propiedad dinámica de un sistema elástico y se relaciona sobre todo con el Módulo de Elasticidad Dinámico y la densidad del sistema, por lo tanto, la frecuencia natural de vibración de una viga puede ser utilizada para determinar su Módulo de Elasticidad Dinámico. Aunque la relación entre la densidad y el Módulo de Elasticidad Dinámico es válida para medios homogéneos, medios sólidos perfectamente isotrópicos y elásticos, puede aplicarse al concreto cuando el tamaño de la muestra es grande en relación al tamaño de sus elementos constitutivos.



Para las vibraciones de flexión de una viga larga, delgada sin restricciones, la siguiente ecuación o su equivalente se puede encontrar en cualquier libro que trate el tema de sonido (Rayleigh, 1945):

**Módulo dinámico de elasticidad o módulo de Young (E)** para un esfuerzo uniaxial, cuando todos los esfuerzos salvo uno el normal son nulos, E, es una constante de proporcionalidad que relaciona este esfuerzo con su deformación lineal.

### Equipo

- Circuito impulsor
- Circuito captador o detector
- Soporte del espécimen
- Sonómetro comercial
- Vernier y flexómetro.

### Especímenes

5 prismas de concreto de 6cm de ancho, 6cm de alto y 26cm de longitud para cada tipo de mezcla.

### Procedimiento.

1. Mantener los especímenes inmersos en agua para un continuo curado hasta el momento de la prueba.
2. Numerar los especímenes, determinar la masa y obtener las medidas reales del ancho, alto y largo del prisma de concreto con ayuda del vernier y una cinta métrica.
3. Marcar justo a la mitad de la longitud de cada espécimen (punto con vibración cero), también marcar una cruz en ambas caras laterales de 6x6cm.
4. Colocar el espécimen en el dispositivo. El oscilador electrónico tocará el centro de la cruz marcada en una cara lateral del prisma, mientras que en la cara opuesta se reposa el medidor con amplificador.
5. Encender el equipo y dejamos reposar por 10 minutos.



6. El voltaje inicial del equipo debe ser de 2 volts aproximadamente.
7. La perilla de ajuste (Gain adj) debe estar al máximo.

**Nota:** La resonancia del concreto suele estar entre 1,000 a 10,000 Hz aproximadamente.

8. Conectar y ajustar el equipo.
9. Vamos variando la frecuencia de resonancia que le aplicamos, y se registra la frecuencia más alta.

### Cálculos

Para las vibraciones de flexión de una viga larga, delgada sin restricciones, la siguiente ecuación (Rayleigh, 1945):

$$N = \frac{m^2 k}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Resolviendo para E, se tiene:

$$E = \frac{4\pi^2 L^4 N^2 \rho}{m^4 k^2} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

E=Módulo de Elasticidad Dinámico

$\rho$ =Densidad del material

L=Longitud del espécimen

N=Frecuencia fundamental flexural

k=Radio de giro de la sección alrededor del eje perpendicular al plano de flexión ( $k=t/(12^{0.5})$  para sección transversal rectangular donde t es el espesor)

m=4.73 (Constante para el modo fundamental de vibración)

De igual manera, el módulo de elasticidad dinámico también puede ser calculado a partir de la frecuencia fundamental de vibración longitudinal de una



muestra sin restricciones, de acuerdo con la siguiente ecuación (Obert and Duvall, 1941):

$$E = 4L^4\rho N^2$$

Ecuación 24

Entonces, la frecuencia de resonancia de vibración de un espécimen o estructura está directamente relacionado con su Módulo Dinámico de Elasticidad y, por lo tanto, con su integridad mecánica.

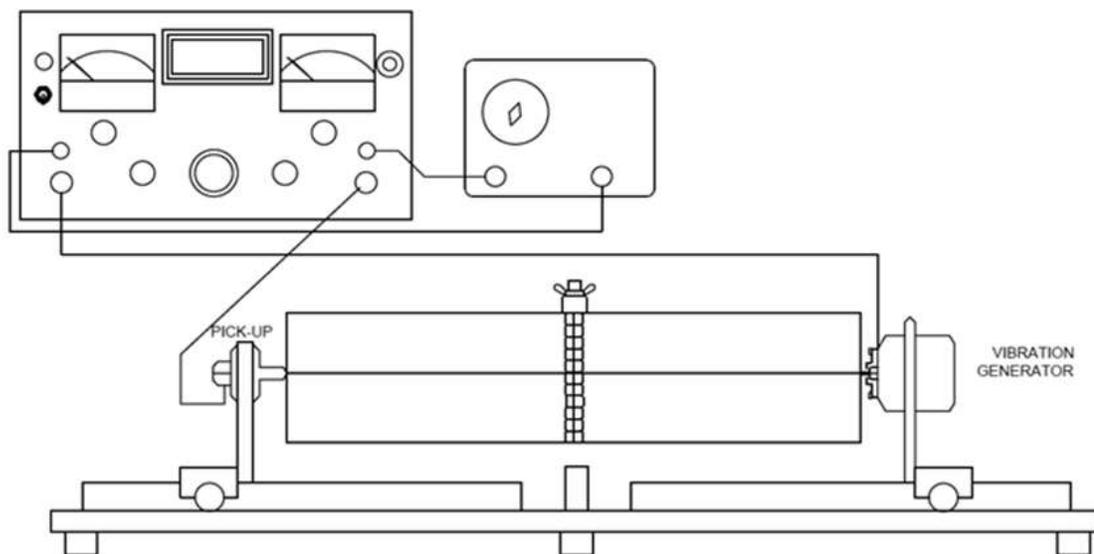


Ilustración 45. "E-METER" mostrando la mesa de trabajo electrodinámica con un "generador de vibraciones de contacto" y un receptor de contacto de acelerómetro piezoeléctrico. Dispuesto para ensayo de resonancia longitudinal de un prisma de concreto. (NDT- JAMES INSTRUMENTS INC. NON DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS)



Ilustración 46 Especímenes prismáticos de 6x6x26cm utilizados para la prueba de frecuencia de resonancia longitudinal. (García Romero, 2021)



Ilustración 47 Colocación del espécimen prismático según lo indica el manual de uso del aparato E-METER. (García Romero, 2021)



Ilustración 48. Vibración de prismas a varias frecuencias. (García Romero, 2021)



Ilustración 49. Se registra la frecuencia más alta detectada para cada espécimen ensayado (García Romero, 2021).



## 3.5. Pruebas Destructivas

### 3.5.1. Compresión simple

La compresión simple, es la aplicación de una carga axial concéntrica a cilindros de concreto. Los resultados de este método se utilizan como base para el control de calidad del concreto, los valores obtenidos, ya que, dependerán de la forma y tamaño del espécimen, de la dosificación, de los procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo, de los moldes, de la fabricación, de la edad, de la temperatura y de las condiciones de humedad durante el curado

#### Equipo.

- Máquina de ensayo universal
- Flexómetro.

#### Especímenes

Cilindros de 10cm de diámetro y 20cm de alto, que fueron previamente cabeceados con mortero de azufre según indica la norma NMX-C-109-ONNCCE-2013.

#### Procedimiento

1. Medir dos diámetros con aproximación a 0.25mm del espécimen y hacer un promedio.
2. Limpiar las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba
3. Colocar el espécimen cilíndrico sobre la placa inferior alineando su eje cuidadosamente con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurando que se tenga un contacto suave y uniforme.
4. Aplicar la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 84 Kgf/cm<sup>2</sup>/min a 210 Kgf/cm<sup>2</sup>/min, equivalente para un diámetro estándar de 15 cm a un rango de 14.8 Tonf/min a 37.1 Tonf/min ( NMX-C-083-ONNCCE-2014)



5. Aplicar la carga hasta que aparezca la falla de ruptura, registrándola en el informe.

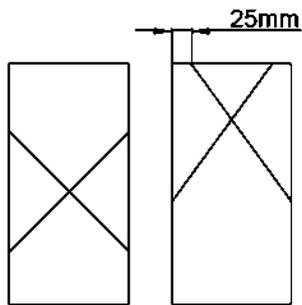


Ilustración 50. TIPO 1. Conos formados en ambos extremos, menores de 25mm de las grietas hasta las tapas

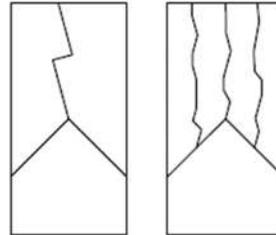


Ilustración 51. TIPO 2. Conos formados en ambos extremos, menores de 25mm de las grietas hasta las tapas.

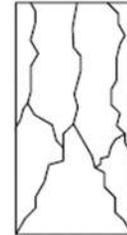


Ilustración 52, TIPO 3. Fracturas verticales de columnas de extremo a extremo conos no formados.



Ilustración 53. TIPO 4. Fracturas diagonales sin agrietamiento en los extremos golpear poco con un martillo para distinguirlo de la falla tipo 1.



Ilustración 54. TIPO 5. Fracturas en los lados de la parte superior o inferior (ocurre comúnmente con tapas no adheridas.



Ilustración 55. TIPO 6. Similar al tipo 5, pero es puntual en un extremo de los cilindros.

### Cálculos.

Para calcular la resistencia a la compresión del espécimen, se divide la carga máxima soportada durante el ensayo entre el área promedio de la sección transversal.

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Ecuación 25

Donde:

$f_c$  = Resistencia a la compresión (Kgf/cm<sup>2</sup>)

F = Carga máxima (Kgf)



$A =$  Área de espécimen ( $\text{cm}^2$ )

La resistencia a la compresión se determina con el promedio de 2 especímenes como mínimo, ensayados a la edad especificada.

El resultado del ensayo se expresa con una aproximación de 100kPa ( $1\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) ( NMX-C-083-ONNCCE-2014; Alvarado Alcazar, 2010; Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011)

### ***3.5.2. Módulos de elasticidad estático***

El módulo de elasticidad estático secante es, es la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial, al estar sometida al esfuerzo de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo -deformación, dentro de la zona elástica. (NMX-C-128-ONNCCE-2013)

#### **Equipo.**

- Máquina de prueba Universal Forney.
- Deformímetro (dos anillos y un micrómetro)
- Medidor de deformación transversal.

#### **Especímenes.**

Se requieren especímenes cilíndricos moldeados de 10cm de diámetro y 20cm de alto, elaborados y curados de acuerdo a los procedimientos especificados en la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016.

#### **Procedimiento.**

1. Colocar el espécimen en una superficie horizontal plana y firme, montar el dispositivo de medición exactamente al centro de los Anillos fijándolos firmemente con los anillos de punta, para evitar que existan deslizamientos.



2. Verificar que los micrómetros del deformímetro queden perfectamente verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen, asegurando que el vástago del micrómetro tenga la carrera suficiente para la deformación que deba registrarse.
3. Ajustar los micrómetros y retirar cuidadosamente las barras que separan los anillos, observando que los indicadores de los micrómetros no registran movimientos importantes (si se mueven hay que repetir los pasos 1 y 2).
4. Colocar el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándolo antes de aplicar la carga.
5. Colocar la carátula de los micrómetros en 0.0 (Cero).
6. Aplicar la primera precarga de 10% al 15% del promedio de la resistencia de ruptura obtenida en los ensayos a compresión, verificando el correcto funcionamiento del micrómetro.
7. Aplicar la carga y registrar deformaciones en las primeras 5t. Si la carátula de la prensa lo permite en las primeras 2t, registrar las deformaciones cada 0.5t. De 5t en adelante, registrar las deformaciones cada 5 toneladas hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo obtenido en los ensayos de compresión. La velocidad de la carga en las primeras 5t debe ser de 1 minuto, de ahí en adelante 20s por cada 5t.
8. Alcanzado el 60% de la carga máxima la máxima obtenida en el ensaye a compresión, es importante reducir la velocidad de aplicación de la carga para permitir que se aflojan los tornillos que fijan los Anillos y de ser posible, evitar deterioro se retiran los micrómetros, después de la cual se proseguirá con la aplicación de la carga hasta llegar a la carga máxima o falla del Espécimen.

#### Cálculos.

1. Con el área del Espécimen, las cargas, las lecturas de deformación y la longitud de medición, deben calcularse los esfuerzos y las



deformaciones unitarias correspondientes a cada carga, así como el esfuerzo máximo.

2. Trazar esfuerzo-deformación unitaria.
3. Determinar el esfuerzo  $S_1$  en  $\text{Kg/cm}^2$  correspondiente a la deformación unitaria ( $e_1$ ) de 0.000050.
4. Determinar el esfuerzo  $s_2$  correspondiente al 40% del esfuerzo máximo.
5. Calcular el módulo de elasticidad empleando la fórmula siguiente:

$$E = \frac{s_2 - s_1}{e_2 - 0.000050}$$

*Ecuación 26*

Donde:

$E$ = Módulo de elasticidad,  $\text{Kg/cm}^2$

$S_1$ = Esfuerzo ( $\text{Kg/cm}^2$ ) de la deformación unitaria ( $e_1$ ) de 0.000050

$S_2$ = 40% del esfuerzo máximo.

$e_2$ = Deformación unitaria de esfuerzo  $S_2$

6. Para obtener el coeficiente numérico de elasticidad, usando la expresión siguiente:

$$K = \frac{E}{\sqrt{f'c}}$$

*Ecuación 27*

Donde:

$E$ = Módulo de elasticidad ( $\text{Kg/cm}^2$ ) obtenido del ensaye.

$K$ = Coeficiente numérico del módulo de elasticidad.

$f'c$ = Resistencia de proyecto a la compresión.

### Informe de la prueba

- a) Número de muestra o identificación.



- b) Resistencia de proyecto del concreto ( $f'c$ ), tamaño máximo del agregado y el revenimiento del proyecto.
- c) Localización del concreto en la estructura.
- d) Revenimiento obtenido del concreto, cm.
- e) Diámetro y longitud promedio del Espécimen (cm)
- f) Edad del concreto (días).
- g) Cargas (t) y deformaciones (mm).
- h) longitud de medición (mm) (distancia entre centros de anillos).
- i) Carga máxima (t).
- j) Forma de falla y observaciones en cuanto al aspecto del concreto.
- k) Esfuerzo máximo a compresión simple de los especímenes que sirvieron de referencia.

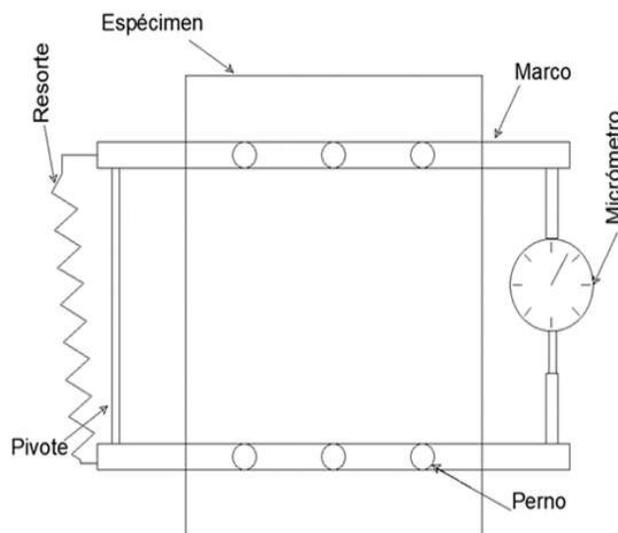


Ilustración 56. Esquema del ensayo de módulo de elasticidad con un micrómetro (NMX-C-128-ONNCCE-2013)



Ilustración 57. el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándolo antes de aplicar la carga. (Bernabé Reyes)



### 3.6. Pruebas Electroquímicas (Corrosión)

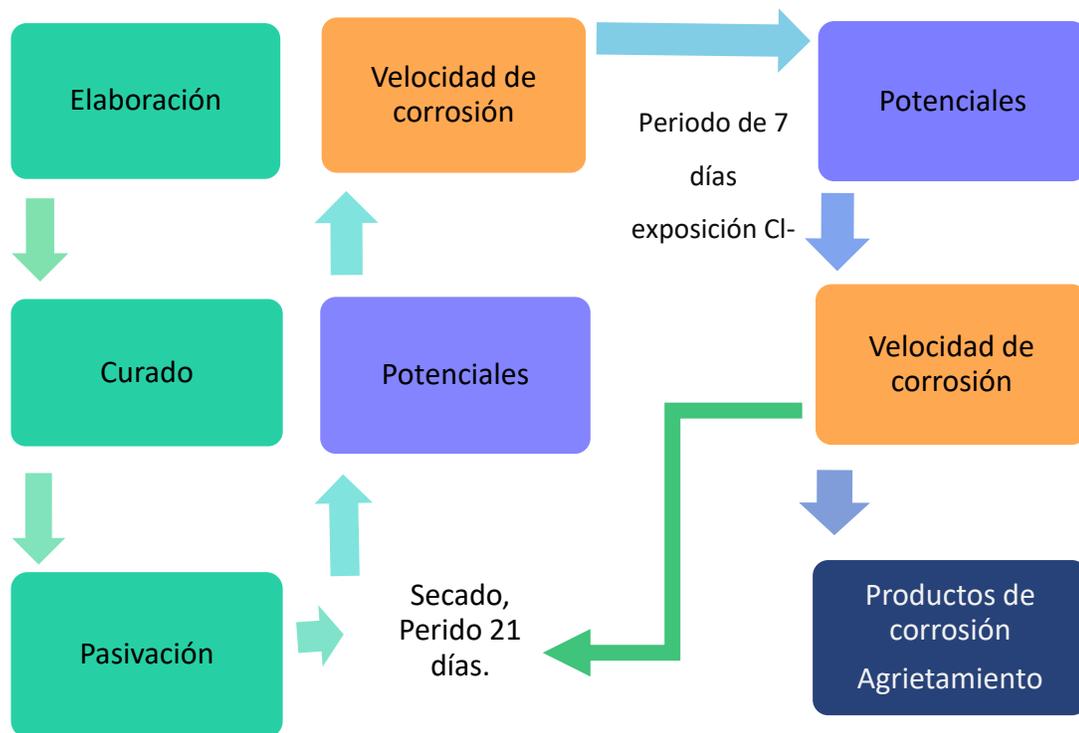
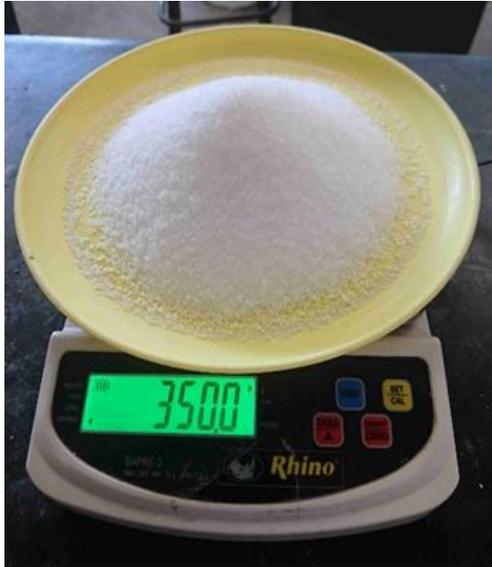


Ilustración 58. Secuencia de pasos para el desarrollo de las pruebas electroquímicas

Para las pruebas electroquímicas primeramente es necesario preparar los especímenes para los ciclos húmedo-seco. Dicha preparación consiste en medir los potenciales de corrosión del acero embebido en concreto y de esa forma verificar su estado pasivo, con el procedimiento que se indica en el apartado 3.5.1.

Para el ciclo húmedo se requiere preparar la solución de NaCl con una concentración de 3.5% respecto a la masa del agua, que simulará el ambiente agresivo por cloruros.



*Ilustración 59. Cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% de la solución en masa respecto al agua. (Bernabé Reyes)*



*Ilustración 60. Agua utilizada para la solución del ciclo húmedo para pruebas de corrosión. (García Romero, 2021)*

Comprobada la pasividad del acero, se procede con la primera prueba de Rpl en estado seco. A partir de la primera prueba se comienzan los ciclos de húmedo-secado.

El ciclo comprende dos análisis, uno en estado húmedo que se determinará 7 días después de sumergir los especímenes en la solución NaCl 3.5%. Después de realizar la prueba los especímenes se mantendrán fuera de la solución por 21 días, considerando este periodo como de secado. Al finalizar este periodo se miden los potenciales y se realiza Rpl.

Con los ciclos de humedecimiento y secado, en solución que simula el ambiente marino (NaCl 3.5%), la exposición a esta acción de deterioro del concreto se clasifica como **4d**, “Ambiente Marino Zona de Salpicadura”. Esta condición de exposición indica “Área rica en sales en contacto con el agua. Estructuras en contacto con el aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado” (NMX-C-155-ONNCCE, 2014).

Mientras que, de acuerdo a la norma NMX-C-495-ONNCCE- 2015, es un “concreto expuesto a humedad y una fuente externa de cloruros”, que se



clasifica como un **CI2**, con un ambiente de exposición de “concreto con cloruros de origen diferente al medio marino”, y una condición de exposición de “concreto reforzado o presforzado expuesto a una fuente extrema de cloruros”. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

### **3.6.1. Potencial de Corrosión**

La técnica electroquímica de mediciones de los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) o media celda, al estar cualitativamente asociada con la tasa de corrosión del acero permite evaluar el grado de corrosión de las estructuras de concreto reforzado. Esta prueba se complementa con la medición de la velocidad de corrosión y de esa forma se asegura el nivel de corrosión presente en la estructura a evaluar. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Nota:** El ensayo dispuesto por la norma mexicana puede utilizarse en cualquier instante de la vida del elemento de concreto.

El Potencial de corrosión (también se le puede denominar como potencial de circuito abierto; potencial de corrosión libre; potencial de reposo; potencial de media celda y potencial estacionario), es el potencial de un electrodo que se corroe en un medio dado, sin flujo de corriente externa que lo genere. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

#### **Especificaciones para evaluar el potencial de corrosión.**

- a) Si los potenciales en un área son más positivos de -200 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, la probabilidad de que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en el momento de la medición es de 10%.
- b) Si los potenciales en un área están en el intervalo de -200 mV a -350 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, la probabilidad que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en el momento de la medición es incierta.
- c) Si los potenciales en un área son más negativos de -350 mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>, la probabilidad de que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en el momento de la medición es de 90%.



- d) Si los potenciales en un área son más negativos de  $-500$  mV vs  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , la actividad de corrosión del acero de refuerzo en el momento de la medición se considera severa.

### **Magnitud numérica de potencial**

La magnitud numérica del potencial por lo general proporciona e indica la presencia o ausencia de corrosión del acero embebido en concreto o mortero de cemento portland no carbonatado, cerca de la punta de la media celda, siempre que el acero no tenga algún revestimiento metálico, por ejemplo, el galvanizado.

### **Datos.**

“Los potenciales de media celda pueden o no ser una indicación de la corrosión existente en el momento de la medición. Los potenciales de media celda pueden, en parte o en su totalidad, reflejar la composición química del electrodo al medio ambiente. Por ejemplo, el aumento de las concentraciones de cloruro puede reducir la concentración de iones ferrosos en un ánodo de acero y la consiguiente reducción del potencial (haciéndolo más negativo). Un potencial de media celda no debe interpretarse como indicativo de la velocidad de corrosión ni de la reacción de corrosión.” (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

### **Equipo**

- Dispositivo de contacto electrolítico (esponja).
- Solución de contacto eléctrico (agua).
- Media celda (Electrodo de Referencia de cobre-sulfato de cobre).
- Voltímetro.



- Cables eléctricos de conexión.

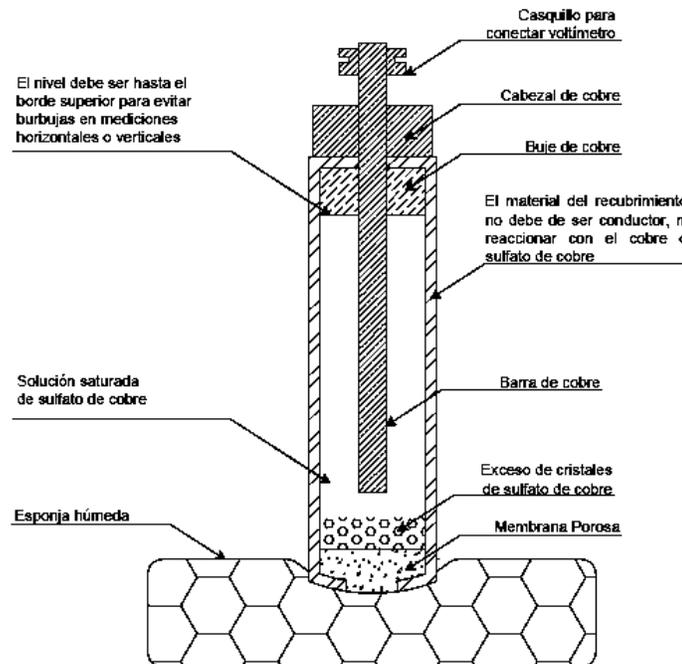


Ilustración 61. Componentes de la media celda cobre-sulfato de cobre (electrodo de referencia) (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

**Nota:** El tapón poroso de la media celda debe estar cubierto cuando no se utilice por periodos largos, ya que podría secarse y los poros se obstruirían con el sulfato de cobre cristalino. La varilla se puede limpiar con una solución diluida de ácido clorhídrico. La solución de sulfato de cobre debe renovarse ya sea mensualmente o antes de cada uso cualquiera que sea el periodo menos largo. No se debe utilizar algún removedor o cualquier otro contaminante para limpiar la varilla de cobre o el tubo de la media celda. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

### Especímenes

Se utilizaron especímenes “paleta”, es decir son primas de 15x5x25cm, los cuales cuentan con dos varillas de 3/8” (acero de refuerzo) y un grafito al centro.



Ilustración 62. Especímenes “paleta” de la mezcla SCBA con agregado CCA y una relación  $a/c=0.45$ , conformados de acero embebido en concreto, los cuales se utilizaron para medir el potencial de corrosión. (García Romero, 2021)

### Procedimiento

1. Conectar eléctricamente un extremo del cable de cobre al electrodo de referencia  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , el otro extremo se conecta a la terminal negativa del voltímetro.
2. Humectar la superficie del espécimen para reducir la resistencia eléctrica del circuito. Para las mediciones se procedió con la humectación de la superficie por el Método B (usando esponjas saturadas por la misma solución de agua y 3.5% NaCl). (NMX-C-495-ONNCCE-2015)
3. Colocar sobre la superficie del concreto previamente humedecido una esponja plana delgada, también humedecida para mejorar el contacto electrodo-concreto. Colocar electrodo sobre la esponja efectuar y registrar la medición. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)



“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”

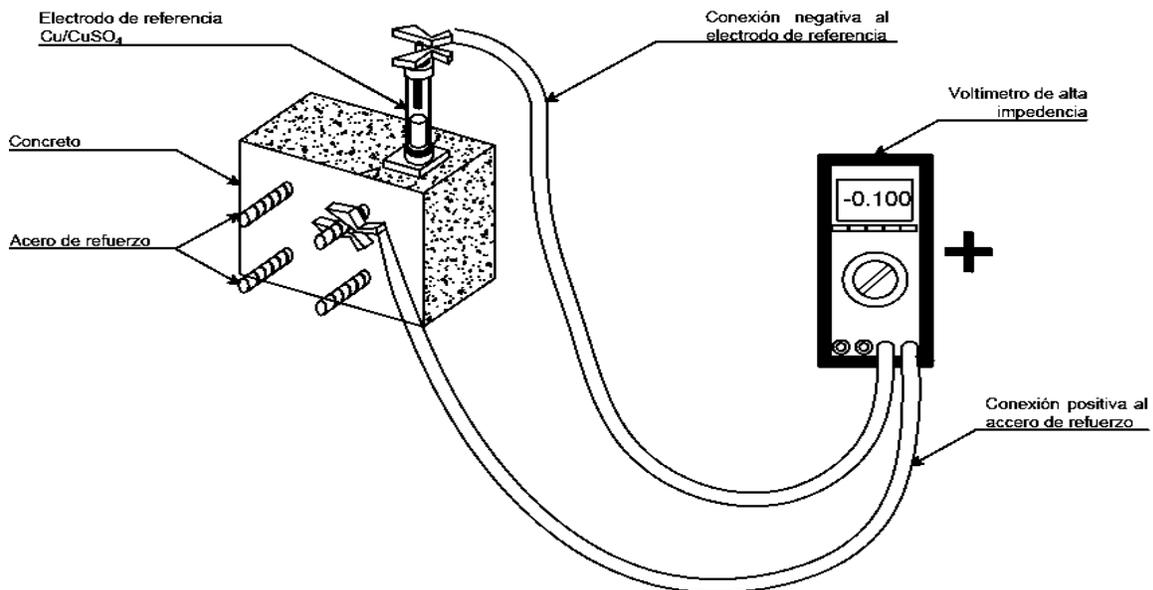


Ilustración 63. Circuito de media celda utilizando un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre (NMX-C-495-ONNCCE-2015)



Ilustración 64. Equipo utilizado para prueba de potencial de corrosión (Bernabé Reyes)

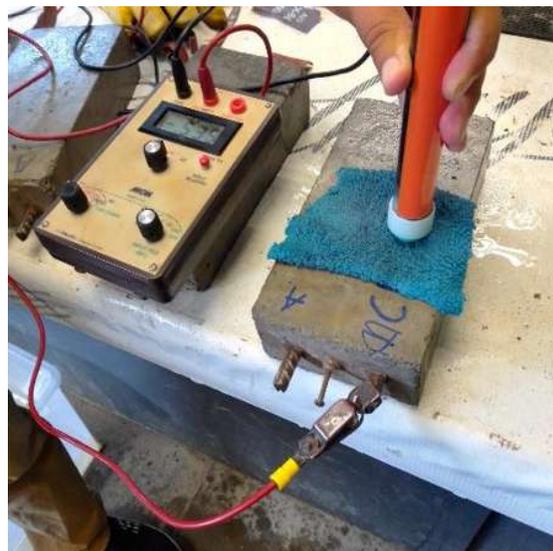


Ilustración 65. Acomodo de equipo para lectura de potencial de corrosión (García Romero,



Ilustración 66. Medición de potencial de corrosión. (García Romero, 2021)

### 3.6.2. Velocidad de Corrosión

La velocidad de corrosión es la cantidad de metal o aleación deteriorada (oxidada) por unidad de área y unidad de tiempo, en  $\text{g/cm}^2\text{d}$  (es decir, gramos por centímetro cuadrado y día). Puede expresarse en función de la penetración en el tiempo ( $\text{mm/año}$ ,  $\mu\text{m/año}$ ). (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

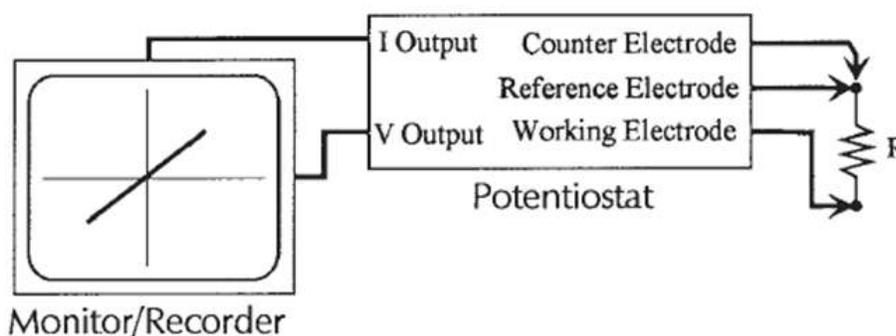


Ilustración 67. Configuración del sistema electroquímico. (ASTM-G59, 2003)

#### Equipos y Materiales.

- Brocha.
- Cepillo
- Lima
- otras herramientas para limpieza manual/mecánica de la superficie.



- Cables y conectores.
- Esponja plana
- agua potable para humedecer la superficie, etc.
- Electrodo de referencia apropiado (er). Ej:  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .
- Potenciostato marca Gamry (Voltímetro de alta impedancia. (CYTED-DURAR, 1998, págs. 124-128)).



Ilustración 68. Potenciostato marca Gamry, modelo E600. Software de operación y de análisis versión 6.33.

Una de las técnicas utilizadas para el cálculo de la velocidad de corrosión es la Resistencia a la Polarización Lineal ( $R_{pl}$ ), siguiendo los lineamientos que enmarca la norma ASTM G59 (ASTM-G59, 2003). Como se observa en el gráfico 2, los valores de  $R_{pl}$  están en función de la relación entre voltaje (V) y corriente (A)

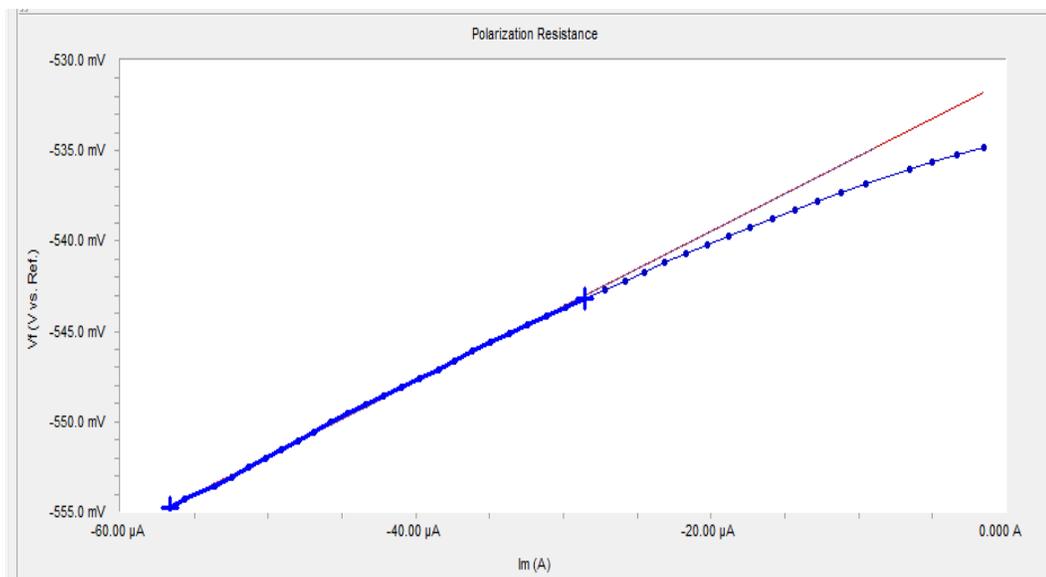


Gráfico 2. Rpl obtenida con el software de análisis del potencióstato Gamry

La técnica electroquímica de la resistencia a la polarización, permite medir la velocidad instantánea de corrosión, ha sido la más utilizada en los últimos 50 años y se define como la pendiente de la tangente a la curva de polarización en las vecindades del potencial de corrosión  $E_{corr}$ , en caso de una reacción controlada por transferencia de carga (Medina Custodio, 2006). En 1978 C. Andrade presenta resultados de mediciones de la velocidad de corrosión en morteros utilizando esta técnica (Andrade & González, 1978).

Los resultados de Rpl permiten conocer comportamientos activos o pasivos del sistema en estudio y la velocidad con que ocurren, es decir, se puede inferir mediante estos resultados la velocidad de corrosión. Para ello es necesario conocer las pendientes de Tafel (Tórres Gómez, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

Un estudio realizado por González et al. (1995) sobre los valores de la constante B en diferentes sistemas metal-medio sugieren que las condiciones del sistema influyen en la determinación de los valores de las pendientes de Tafel ( $b_a$  y  $b_c$ ), no logrando exactitud en el método de Rpl. Destacan que las capas superficiales protectoras de producto de corrosión contribuyen a la dispersión de los valores de la constante B (González, Albéniz, & Feliu, 1996).



Cuando los electrones circulan por el electrolito encuentran una cierta dificultad al moverse, a esta "dificultad" se le llama Resistencia a la polarización. La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Así esta ecuación es una analogía de la ley de Ohm, que establece que la intensidad de la corriente eléctrica  $i$  que circula por un elemento resistivo, es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada  $V$ , e inversamente proporcional a la resistencia del mismo  $R$ , según expresa la ecuación 27 y 28 (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010):

$$i = \frac{V}{R} \quad \text{ley de ohm} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad \text{Stern y Geary} \quad \text{Ecuación 29}$$

La constante  $B$  depende exclusivamente de las pendientes de Tafel, que son calculadas a partir de una curva de Tafel o de polarización. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década (Rodríguez Gómez F. , 2000; Tres G. & E. Saborio, 2004).

Los resultados de  $R_{pl}$  permiten conocer comportamientos activos o pasivos del sistema en estudio y la velocidad con que ocurren, es decir, se puede inferir mediante estos resultados la velocidad de corrosión. Para ello es necesario conocer las pendientes de Tafel (Tórres Gómez, Aperador, Vera , Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010). Recordando siempre que pendientes con valores grandes corresponden a resistencias a la polarización ( $R_p$ ) más altas y en general mejores condiciones protectoras del metal.

Una vez obtenido el valor de  $R_{pl}$ , se procede a calcular la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) mediante la ecuación de Stern y Geary ecuación 31 y ecuación 32 (1957) (ASTM-G59, 2003):



$$i_{corr} = 10^6 \frac{B}{Rp}$$

Ecuación 30

$$B = \frac{b_a b_c}{[2.303(b_a + b_c)]}$$

Ecuación 31

Donde:

$i_{corr}$  = densidad de corriente en  $\mu A/cm^2$ ;

B = factor de Stern-Geary que depende de las pendientes de Tafel: anódica ( $b_a$ ) y catódica ( $b_c$ ), en V;

$R_p$  = resistencia a la polarización en  $ohm \cdot cm^2$ .

De la ecuación 30  $b_a$  y  $b_c$ , son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente (ASTM-G5, 2004).

Es de suma importancia mencionar que la ecuación de Stern y Geary, es válida cuando exista control activacional o de transferencia de carga. El metal debe estar sumergido en un electrolito conductor, o sea que la resistividad de las soluciones no sea alta y debe encontrarse libre de películas resistivas, pues la  $R_p$  es una técnica que globaliza las contribuciones resistivas y no alcanza a discriminarlas. Si se trabaja con sistemas altamente resistivos se recomienda el uso de otra técnica electroquímica llamada Espectroscopia de impedancia electroquímica (Medina Custodio, 2006).

Se recurrió a utilizar un valor de B de 0.026 V, el cual indica un fenómeno de corrosión libre. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década. Para obtener 0.026 V del valor de B, se considera 120 mV/década (Rodríguez Gómez F. , 2000; Tres G. & E. Saborio, 2004).

A partir del valor total de la corriente, la densidad de corriente se calcula con la ecuación 31 (ASTM-G102, 1999):



$$i_{corr} = \frac{I_{corr}}{A}$$

Ecuación 32

Donde:

$I_{corr}$  es la corriente total en  $\mu A$

$A$ =área expuesta en  $cm^2$ .

Las siguientes ecuaciones representan el cálculo de la velocidad de corrosión en términos de velocidad de penetración ecuación 32 y 33

$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW$$

Ecuación 33

$$MR = K_2 i_{corr} EW$$

Ecuación 34

Donde:

$CR$ = velocidad de corrosión, las unidades dependerán del valor de  $K_1$ .

$MR$ = velocidad de corrosión medida en pérdida de masa, las unidades dependerán del valor de  $K_2$ .

$EW$ = peso equivalente, se considera adimensional.

$\rho$ = densidad del material.

El factor y las unidades de los elementos de la fórmula se obtienen de la tabla 37 y 38 que proporciona la norma ASTM G102.

Los parámetros usados en el cálculo de la resistencia a la polarización lineal se describen en la siguiente tabla:



Tabla 36. Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión de Faraday (A)

A				
Unidad de velocidad de penetración (CR)	Unidades de $i_{cor}$	Unidades de $\rho$	$K_1$	Unidades de $K_1^A$
mpy	$\mu A/cm^2$	$g/cm^3$	0.1288	mpy g/ $\mu A$ cm
mm/yr <sup>B</sup>	$A/m^{2B}$	$kg/m^{3B}$	327.2	mm kg/A m y
mm/yr <sup>B</sup>	$\mu A/cm^2$	$g/cm^3$	$3.27 \times 10^{-3}$	mm g/ $\mu A$ cm y

<sup>A</sup>EW es adimensional

<sup>B</sup>Unidades en SI

Tabla 37. Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión de Faraday (B)

B			
Unidad de velocidad de pérdida de masa	Unidades de $i_{cor}$	$K_2$	Unidades de $K_2^A$
$g/ m^{2d}{}^B$	$A/m^{2B}$	0.1288	g/Ad
mg/dm <sup>2</sup> d (mdd)	$\mu A/cm^2$	327.2	mg cm <sup>2</sup> / $\mu A$ dm <sup>2</sup> d
mg/dm <sup>2</sup> d (mdd)	$A/m^{2B}$	$3.27 \times 10^{-3}$	mg m <sup>2</sup> / A dm <sup>2</sup> d

El manual de la Red Durar establece un factor de cálculo para velocidad de corrosión a partir de la densidad de corriente de corrosión, el cual se muestra en la ecuación 34 (CYTED-DURAR, 1998).

$$CR = \frac{M}{n \cdot F \cdot \rho} i_{corr} = 11.6 * i_{corr} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

CR= velocidad de corrosión en  $\mu m/año$ .

M= masa atómica del metal en gramos.

F= constante de Faraday (96500 coulombios).



“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”



$\rho$ = densidad en g/cm<sup>3</sup>. El valor de  $i_{corr}$  está dado en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

La ventaja de utilizar la técnica de Rpl es que proporciona velocidad de corrosión instantánea, y teniendo como limitaciones la necesidad de un potencial estable, una adecuada velocidad de barrido y la caída óhmica en sistemas altamente resistivos (Rodríguez Gómez F. , 2002).



## 4. Resultados y Discusiones

### 4.1. Resultados de pruebas a los materiales

#### 4.1.1. Resultados de análisis al Cemento.

##### 4.1.1.1. Densidad

Tabla 38. Valor de la densidad del cemento CPC-30R usado en la investigación

Muestra	Masa del cemento (g)	Lectura inicial (L <sub>i</sub> )	Lectura final (L <sub>f</sub> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
1	60	0.7	20.4	3.04569	3.05
2	60	0.7	20.4	3.04569	
3	60	0.6	20.3	3.04569	

De acuerdo con la norma NMX-C-152-ONNCCE-2015, el cemento se encuentra dentro del rango de valores de 2.9 a 3.15 g/cm<sup>3</sup>. (NMX-C-152-ONNCCE-2015)

##### 4.1.1.2. Consistencia normal y tiempos de fraguado.

De acuerdo con la norma NMX-C-021-ONNCCE-2015. El límite permisible para el fraguado inicial es de mínimo 90 minutos, mientras que, para el fraguado final es de máximo 1080 minutos, tabla 40. (NMX-C-021-ONNCCE, 2015)

Tabla 39. Especificaciones físicas que deben cumplir los morteros (NMX-C-021-ONNCCE, 2015)

Determinación	Unidad	Condición	Especificación
Tiempo de fraguado inicial	min	Mínimo	90
Tiempo de fraguado final	min	Máximo	1080

En la tabla 41 se muestran las proporciones de la pasta y los tiempos de fraguado inicial y final.



Tabla 40. Resultados de consistencia normal y tiempos de fraguado para las pastas de cemento y cemento con sustitución SCBA 10%.

Pasta	Material	Cantidad	Unidad	Penetración Vicat (mm)	Hora de inicio	Fraguado inicial (min)	Fraguado final (min)
Testigo	Cemento	300	g	11	10:32	162	428
	Agua	90*	ml				
SCBA	Cemento	270	g	10	11:19	276	486
	Ceniza	30	g				
	Agua	112**	ml				

\* Consistencia normal (30%) de la pasta de cemento para testigo.

\*\* Consistencia normal (37.4%) de la pasta de cemento con sustitución de 10 % de SCBA.

El tiempo de fraguado inicial de ambos morteros (testigo y SCBA), es superior al establecido por la norma. Para el fraguado final ambas mezclas están por debajo de los 1080 minutos de la norma. El mortero que tiene una sustitución del 10% con SCBA, triplica el tiempo de fraguado inicial de la normativa y, su periodo entre el fraguado inicial y el final es mucho más corto que el de la mezcla testigo.

#### 4.1.2. Resultados de pruebas físicas a los agregados pétreos

En la tabla 42, se muestran los resultados de las pruebas a las que fueron sometidos los agregados pétreos previamente a este trabajo de investigación y si es que cumplieron con las especificaciones de la norma mexicana.

Tabla 41. Resultados obtenidos de la caracterización de agregados pétreos

Prueba	Especificación de Normatividad	Arena volcánica "	Grava triturada (CCA)	Grava reciclada (RCA)
<b>M.V.S.S</b> (NMX-C-073-ONNCCE-2004)	No establece	1.34 g/cm <sup>3</sup>	1.40 g/cm <sup>3</sup>	1.15 g/cm <sup>3</sup>
<b>M.V.S.V.</b> (NMX-C-073-ONNCCE-2004)	No establece	1.5 g/cm <sup>3</sup>	1.54 g/cm <sup>3</sup>	1.28 g/cm <sup>3</sup>
<b>Humedad de absorción</b> (NMX-C-166-ONNCCE-2017.)	2%-4%	3.5 % <b>media</b>	1.6 % <b>baja</b>	6.05 % <b>alta</b>



Prueba	Especificación de Normatividad	Arena volcánica "	Grava triturada (CCA)	Grava reciclada (RCA)
<b>Densidad</b> (NMX-C-165-ONNCCE-2019)	> 2.15 g/cm <sup>3</sup>	2.4 g/cm <sup>3</sup> <b>aceptable</b>	2.64 g/cm <sup>3</sup> <b>aceptable</b>	2.16 g/cm <sup>3</sup> <b>aceptable</b>
<b>Contenido de material fino (pasa la malla ASTM No. 200)</b> (NMX-C-111-ONNCCE-2018)	5% máx.	4.41% <b>aceptable</b>	0.00 % <b>aceptable</b>	0.58 % <b>aceptable</b>
<b>Módulo de Finura</b> (NMX-C-111-ONNCCE-2018)	2.3- 3-2	2.7 <b>aceptable</b>	-	-
<b>Terrones de arcilla</b> (NMX-C-071-ONNCCE-2004)	0.5-1% máx.	0.65 <b>aceptable</b>	-	-
<b>Equivalente de arena</b> (NMX-C-480-ONNCCE-2014)	85% mín.	92.1 <b>aceptable</b>	-	-
<b>Colorimetría</b> (NMX-C-111-ONNCCE-2018)	No. 3 máx.	No. 2 <b>aceptable</b>	-	-

#### 4.1.2.1. Granulometría de agregado fino (arena) de “La Unión”

Tabla 42. Límite de granulometría para agregado fino. (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

Malla	Material acumulado en masa, en porcentaje; % que pasa
9.5mm (3/8")	100
4.75 mm (No. 4)	95-100
2.36mm (No 8)	80-100
1.18mm (No 16)	50-85
0.600 mm (No. 30)	25-60
0.300mm (No. 50)	10-30
0.150mm (No. 100)	2-10

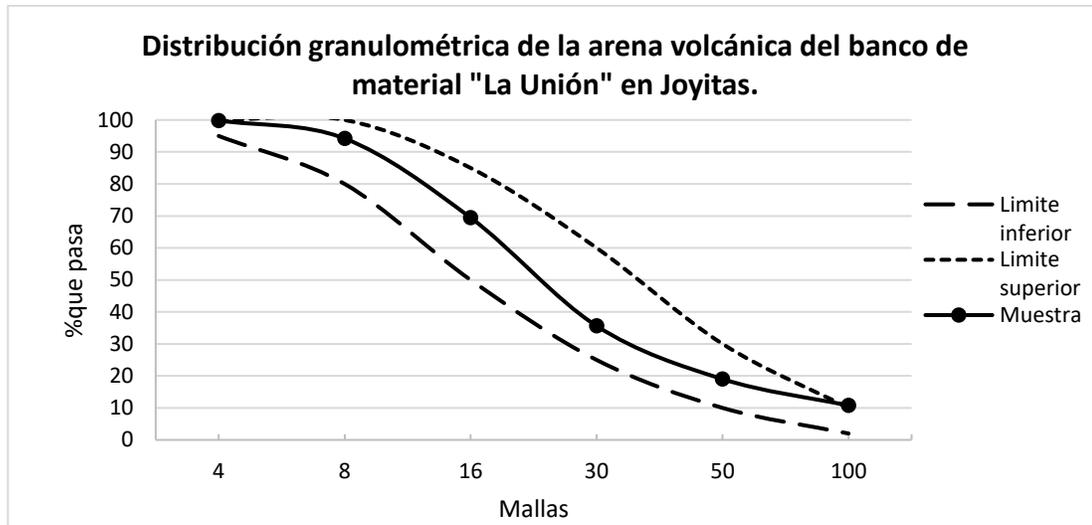


Gráfico 3. Curva de distribución granulométrica de la arena volcánica.

En el gráfico 3, se puede observar que la granulometría de la arena volcánica, se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la norma, los cuales se definen en la tabla 43.(NMX-C-111-ONNCCE-2018)

#### 4.1.2.2. Granulometría de los agregados gruesos.

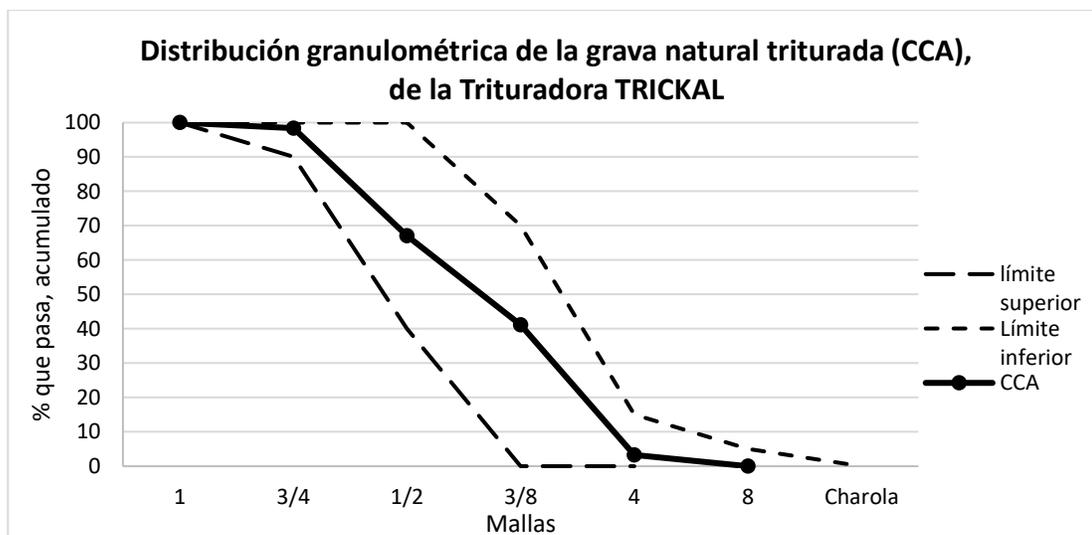


Gráfico 4. Curva de distribución granulométrica de la CCA

La gráfica 4 muestra los resultados del análisis granulométrico de la grava CCA. La composición granulométrica de la CCA se encuentra dentro de los límites establecidos para el tamaño nominal (T.M.=1/2”) del agregado grueso de acuerdo con la norma mexicana. (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

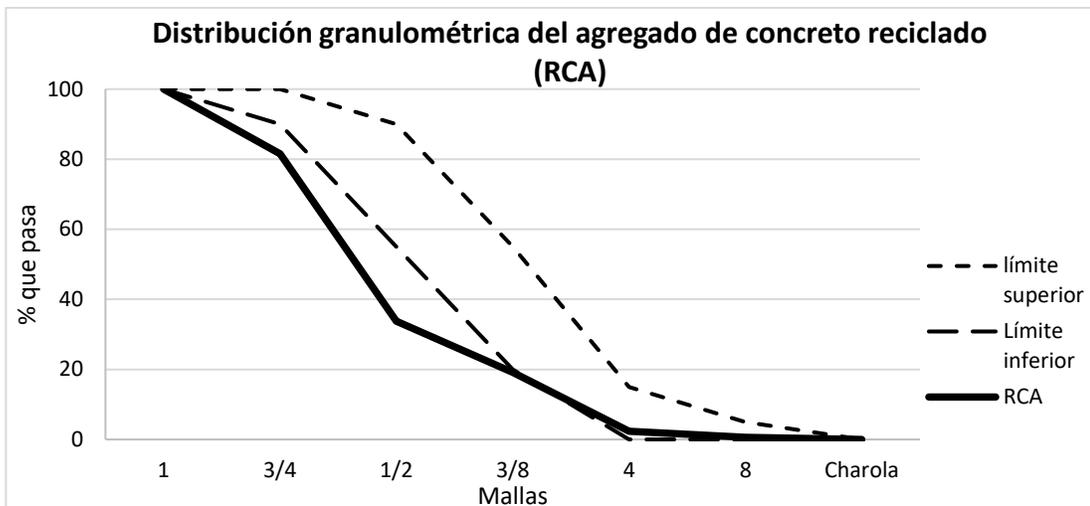


Gráfico 5. Curva de distribución granulométrica de RCA

La granulometría de la grava RCA que tiene un T.M.=3/4” está fuera de los límites establecidos por la norma, entre las mallas 1/2” a la 3/4”. (NMX-C-111-ONNCCE-2018)

#### 4.1.3. Resultados del análisis del agua usada para elaborar las mezclas de concreto

Tabla 43. Resultados de análisis del agua potable en el laboratorio de materiales

Muestra:	Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo			
Sitio del muestreo:	Laboratorio de Materiales			
Nombre de referencia:	NMX-C-ONNCCE-2004			
Parámetro	Resultado	Límite permisible NMX-C-ONNCCE-2004	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	UpH	NMX-AA-008-SCFI-2016
Temperatura	29.8	-	°C	NMX-AA-007-SCFI-2013
Conductividad eléctrica	456	-	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-2018
Sólidos disueltos totales	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2015
Oxígeno Disuelto	3.37	-	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
Sulfatos	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-SCFI-2014
Cloruros	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
Dureza Cálrica	21	-	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico
Sales de magnesio	5	100	mg/L	Volumétrico



El agua es apropiada para su uso en la elaboración de los especímenes de concreto hidráulico y el curado por inmersión, ya que se cumplen todos los parámetros especificados por la normativa NMX-C-122-ONNCCE-2004.

## 4.2. Resultados de pruebas no destructivas

### 4.2.1. Resultados de Resistividad eléctrica

La norma NMX-C-530-ONNCCE-2018 especifica los criterios para la evaluación de los resultados de la resistividad eléctrica.

Tabla 44. Riesgo de Corrosión (NMX-C-530-ONNCCE-2018)

Resistividad	Probabilidad de corrosión (porosidad interconectada)
$\rho > 100 - 200 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad muy baja
$100 > \rho > 50 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	porosidad baja
$50 > \rho > 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad de consideración
$\rho < 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Porosidad excesiva

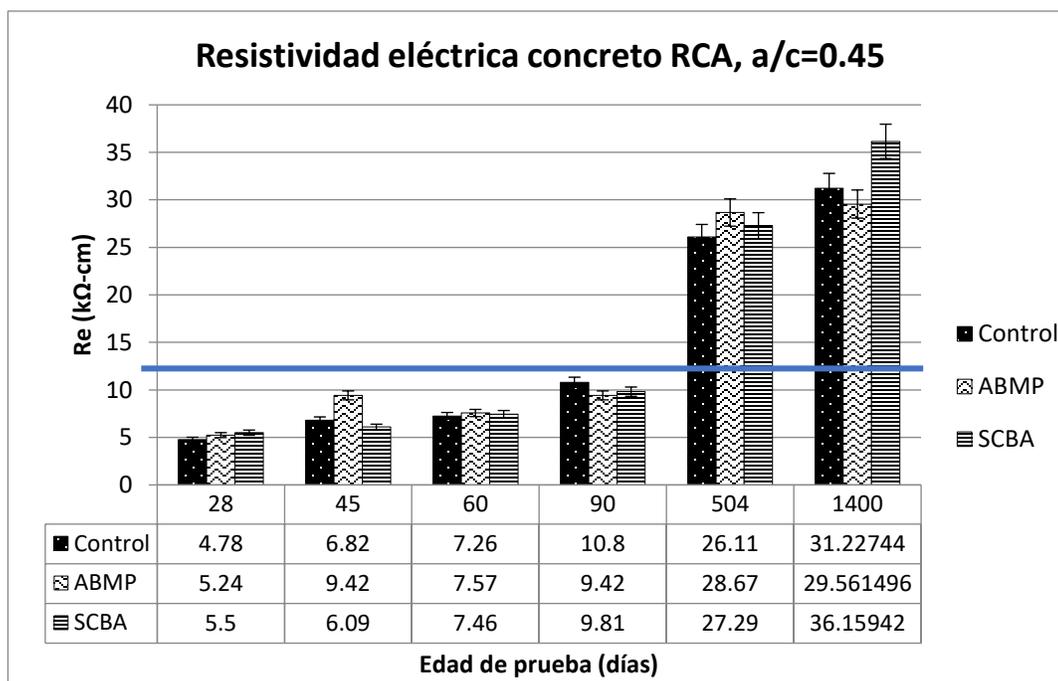


Gráfico 6. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con sustitución de agregado de concreto reciclado (RCA), relación a/c= 0.45.



En el gráfico 6. Se muestran los resultados de las mezclas con RCA y una relación  $a/c=0.45$ . Se observa que la mezcla con sustitución de ceniza de bagazo de caña (SCBA) superó a las demás.

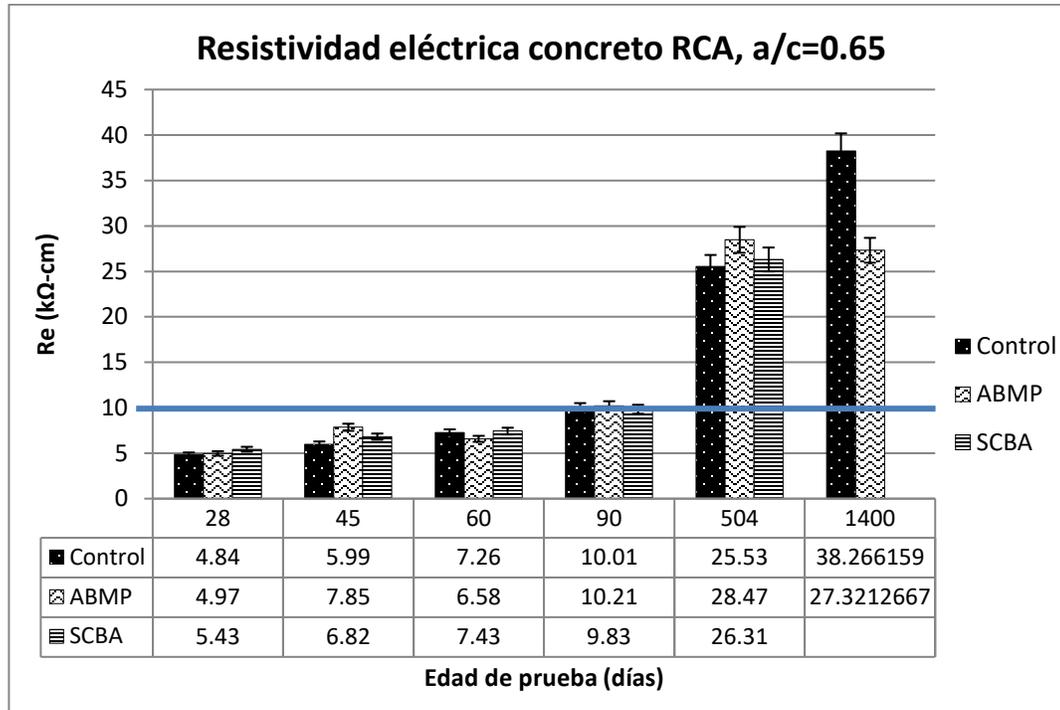


Gráfico 7. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con sustitución de agregado de concreto reciclado (RCA), relación  $a/c=0.65$ .

La mezcla control-RCA con relación  $a/c=0.65$  (gráfico 7), tiene un mejor comportamiento con respecto a las otras mezclas.

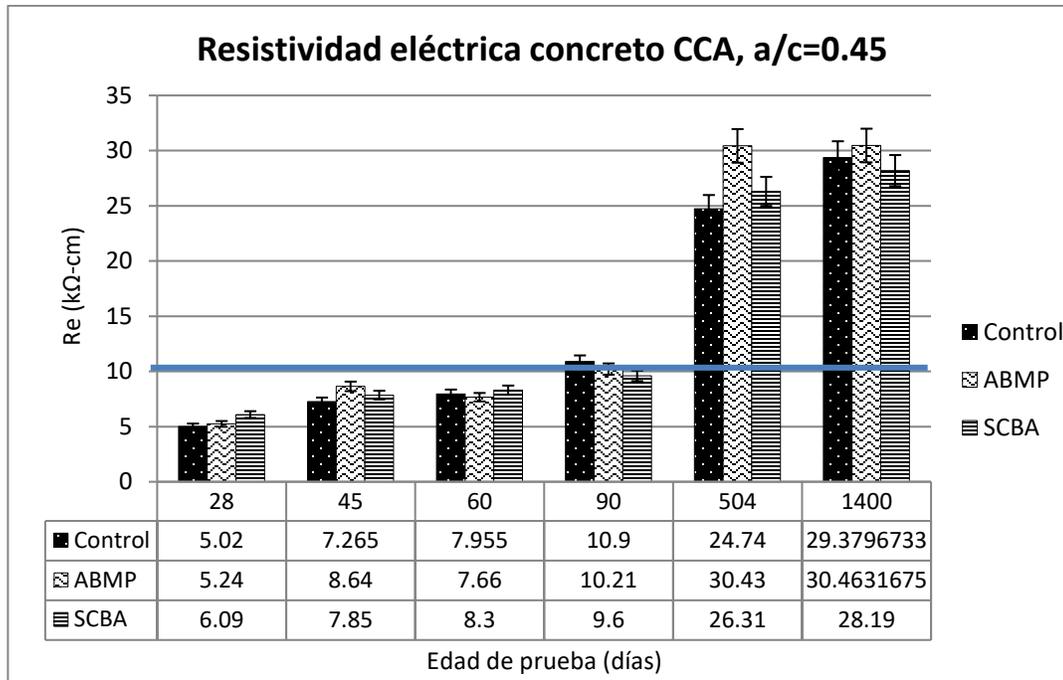


Gráfico 8. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con agregado natural triturado (CCA), relación a/c=0.45.

En el gráfico 8 que muestra los resultados de las mezclas con CCA y una relación a/c=0.45, se aprecia que la mezcla ABMP se mantiene constante desde la edad de 504 días hasta los 1400 días. Además de que, a los 1400 días los resultados de la muestra Control es muy similar a la ABMP.

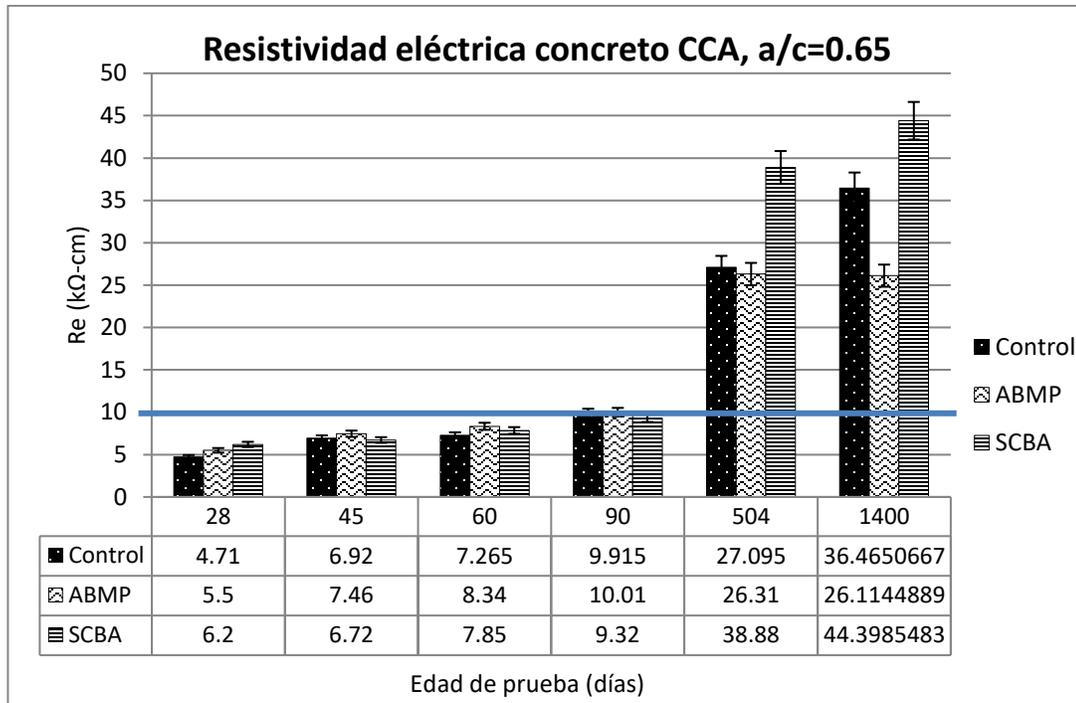


Gráfico 9. Valores de resistividad eléctrica (RE) de las mezclas de concreto endurecido. Con agregado natural triturado (CCA), relación a/c=0.65.

Por último, de las mezclas con CCA y relación a/c=0.65, la mezcla con mejor resultado es la SCBA a los 1400 días.7.

De acuerdo a lo establecido por la norma NMX-C-530-ONNCCE-2018, el concreto endurecido a edades tempranas (de 28 a 90 días) en todas las mezclas presentan una resistividad menor a 10KΩ-cm, por lo que se consideran como “concreto de porosidad excesiva” y su probabilidad de corrosión es muy alta. A edades tardías, es decir de 504días y 1400 días, todos los valores de las mezclas se encuentran en el rango de 10KΩ-cm a 50KΩ-cm, así que se clasifica como de “porosidad de consideración”. (NMX-C-530-ONNCCE-2018).



## 4.2.2. Resultados de Frecuencia de Resonancia

### Longitudinal

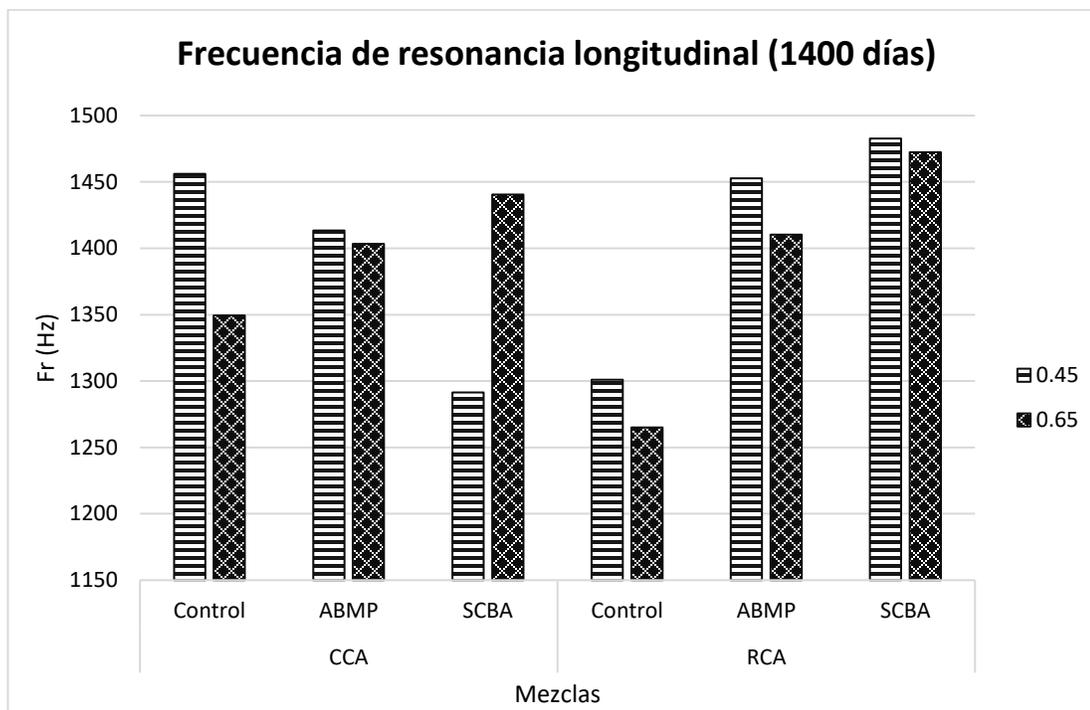


Gráfico 10. Valores de Frecuencia de resonancia para mezclas de concreto endurecido en Vigas de 6x6x26cm. Probados a edades de 1400 días.

La mezcla con sustitución del 10% de SCBA-RCA con relación  $a/c=0.45$ , tiene una mayor densidad en comparación del resto de mezclas, de acuerdo con los resultados de la prueba de Frecuencia de resonancia longitudinal que se pueden observar en la gráfica 10. La mezcla Control-RCA con relación  $a/c=0.65$  demostró el más bajo valor de frecuencia de resonancia.

Los resultados en general de esta prueba son mucho más bajos de los reportados en la literatura, esto lo atribuimos a que se trabajó con diferentes materiales, con diferentes dimensiones de los especímenes. Y todo esto modifica el comportamiento dinámico del concreto hidráulico en estudio.



### 4.2.3. Resultados de Prueba de Fagerlund (porosidad efectiva, Densidad y gravedad específica)

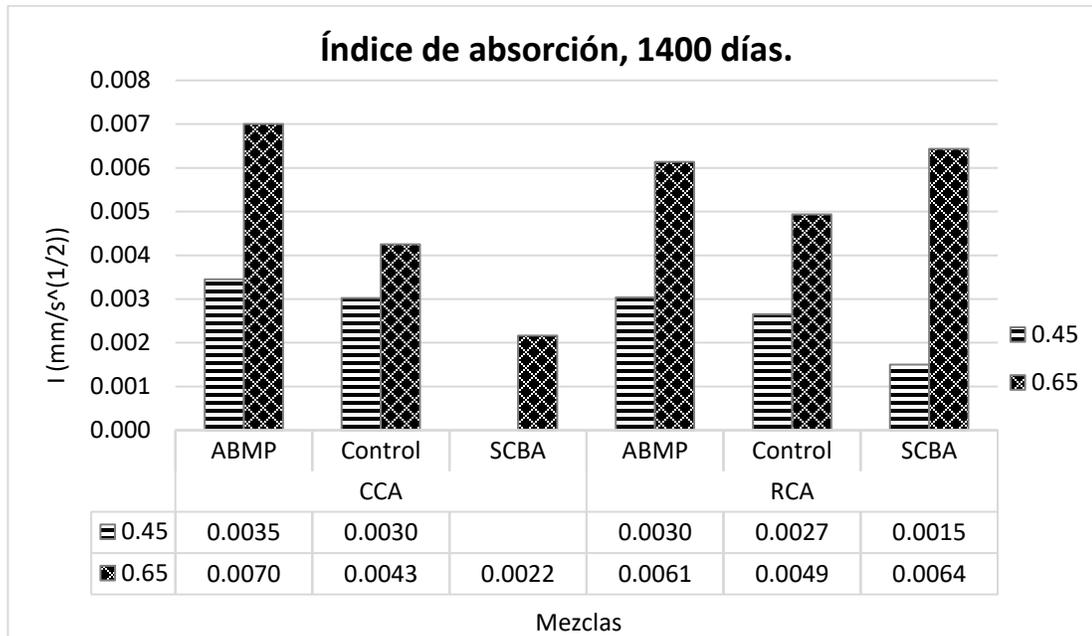


Gráfico 11. Valores de índice de absorción ( $I$ ), obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días.

De acuerdo con los resultados mostrados en el gráfico 11, las mezclas con relación  $a/c=0.65$  tienen un índice de absorción mayor que las mezclas con relación  $a/c=0.45$ , siendo la mezcla con sustitución del 10% de ABMP con Agregado CCA y relación  $a/c=0.45$  la que muestra la mayor absorción con un valor de  $0.0070\text{mm/s}^{1/2}$ . La mezcla con un menor índice de absorción resultó la mezcla con una sustitución del 10% de SCBA con sustitución de agregado RCA y relación  $a/c=0.45$  con un valor de  $0.0015\text{ mm/s}^{1/2}$ .

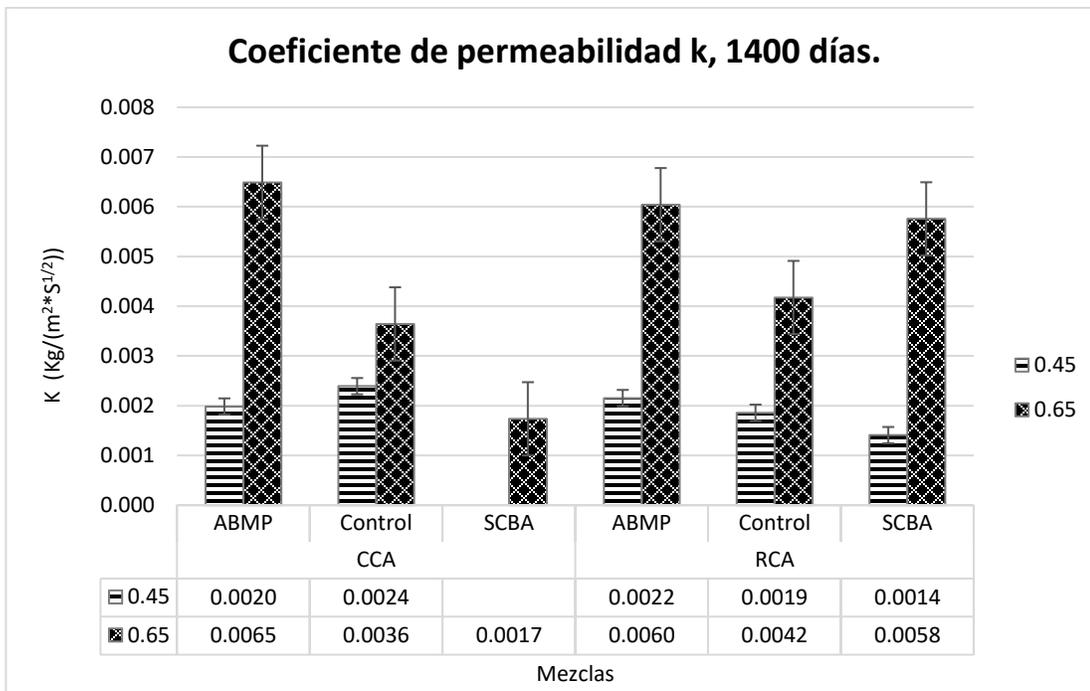


Gráfico 12. Valores del coeficiente de permeabilidad (K), obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días.

Los resultados del coeficiente de permeabilidad mostrados en el gráfico 13 revelan que los mayores valores fueron obtenidos por las mezclas con una relación a/c=0.65. Las mezclas con relación a/c=0.45 obtuvieron valores por debajo de 0.0024Kg/(m<sup>2</sup>\*s<sup>1/2</sup>). La mezcla con mayor coeficiente de permeabilidad= 0.00649 Kg/(m<sup>2</sup>\*s<sup>1/2</sup>) es la que contiene una sustitución del 10% de ABMP agregado CCA y relación a/c=0.65. La mezcla con menor resultado es la de Sustitución al 10% de SCBA-RCA con relación a/c=0.45 con un valor de 0.00141 Kg/(m<sup>2</sup>\*s<sup>1/2</sup>).

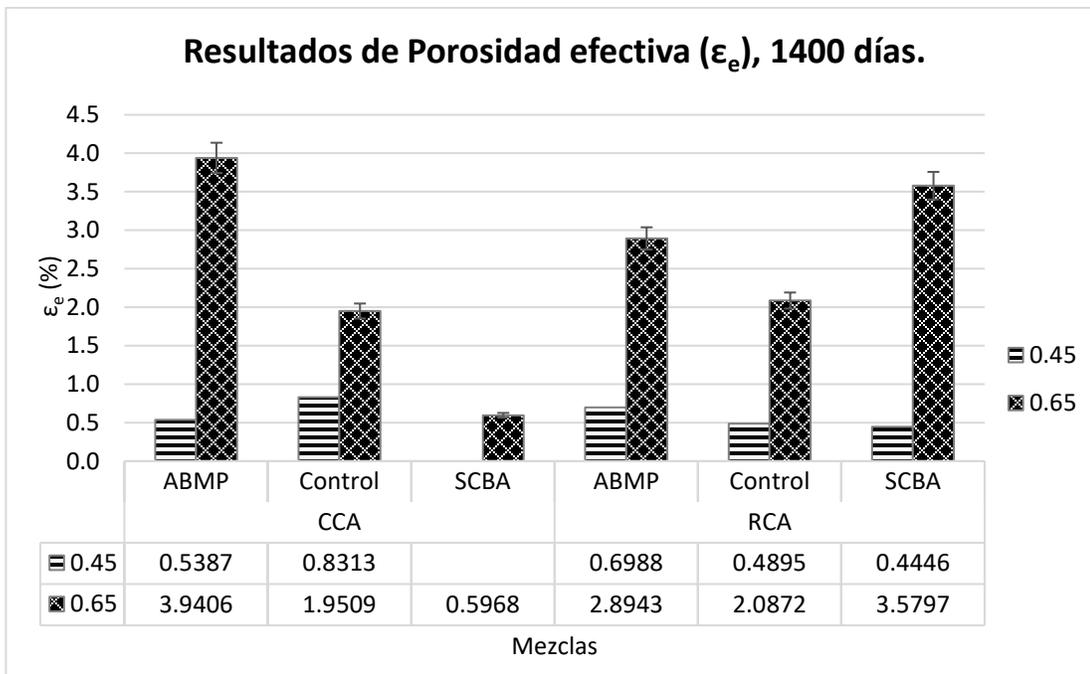


Gráfico 13. Valores de porosidad efectiva ( $\epsilon_e$ ), expresada en porcentaje, obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días.

De la misma forma que los resultados anteriores. Las mezclas con relación  $a/c=0.65$  superaron por creces a las otras con relación  $a/c=0.45$ . La mezcla con mayor porosidad efectiva es la ABMP-CCA y relación  $a/c=0.65$  con un valor de 3.94%. La mezcla SCBA-RCA y relación  $a/c=0.45$  obtuvo resultados de  $\epsilon_e=0.44\%$

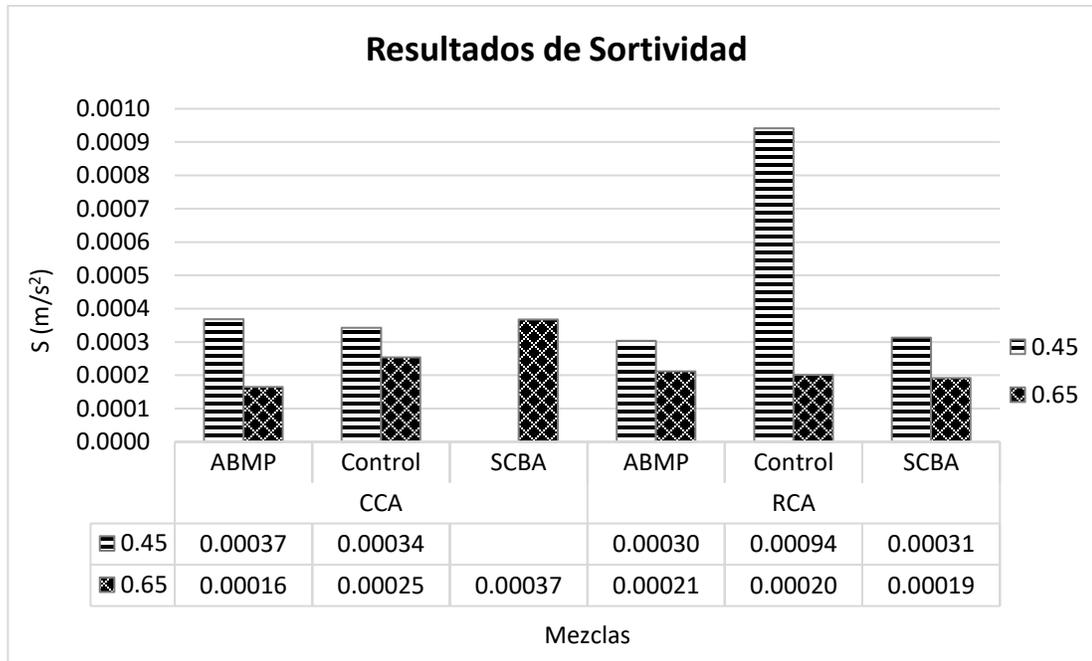


Gráfico 14. Valores de sortividad (S), obtenidos de la prueba de absorción capilar a la edad de 1400 días.

Las mezclas con una mayor sortividad son las que tienen una relación a/c=0.45, siendo la mezcla Control-RCA la que obtuvo por mucho mayores resultados. El resto de las mezclas se encuentran por debajo de los 0.004m/s<sup>2</sup>.



### 4.3. Resultados de pruebas destructivas.

#### 4.3.1. Resultados de ensayo a compresión simple

La resistencia de proyecto del concreto para relaciones  $a/c=0.45$  era un  $f'c=300\text{Kgf/cm}^2$  (30MPa).

La resistencia de proyecto del concreto con relaciones  $a/c=0.65$  era un  $f'c=180\text{Kgf/cm}^2$  (18MPa).

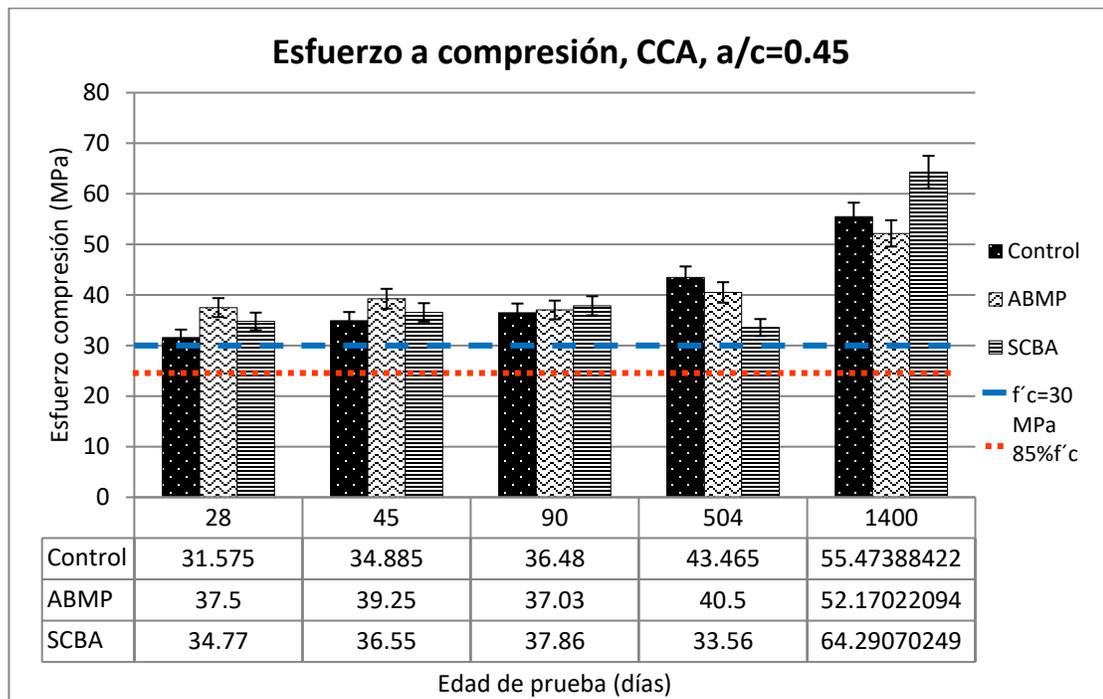


Gráfico 15. Comparación de resistencia a compresión de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación  $a/c=0.45$ .

Desde edades tempranas las mezclas superaron su  $f'c$  de proyecto. La mezcla con sustitución del 10% de ABMP-CCA relación  $a/c=0.45$  obtuvo mejores resistencias a la compresión a edades tempranas, a los 90 días fue superada por la mezcla con sustitución del 10% de SCBA-CCA relación  $a/c=0.45$ , siendo que esta última a los 1400 días la que obtuvo un valor mayor a 64MPa.

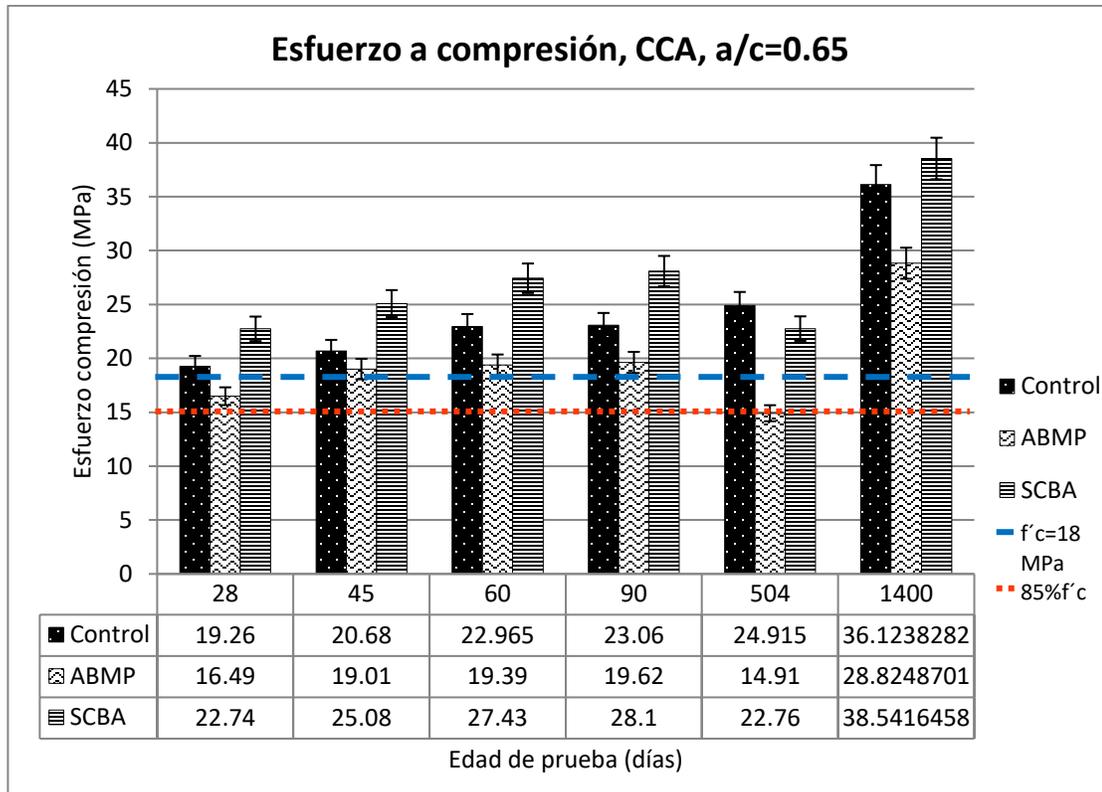


Gráfico 16. Comparación de resistencia de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación a/c=0.65.

A los 28 días la única mezcla que no superó el  $f'c=18\text{MPa}$  de proyecto fue la mezcla con sustitución del 10% de ABMP-CCA relación a/c=0.65, dicha mezcla es la que obtuvo menores resultados en todas las edades, apenas llegando a los 28MPa a los 1400 días de prueba. La mezcla con mejores resultados en todas las edades fue aquella con sustitución del 10% de SCBA-CCA relación a/c=0.65, de 22.74MPa a los 28 días y llegando a 38.5MPa a los 1400 días de análisis.

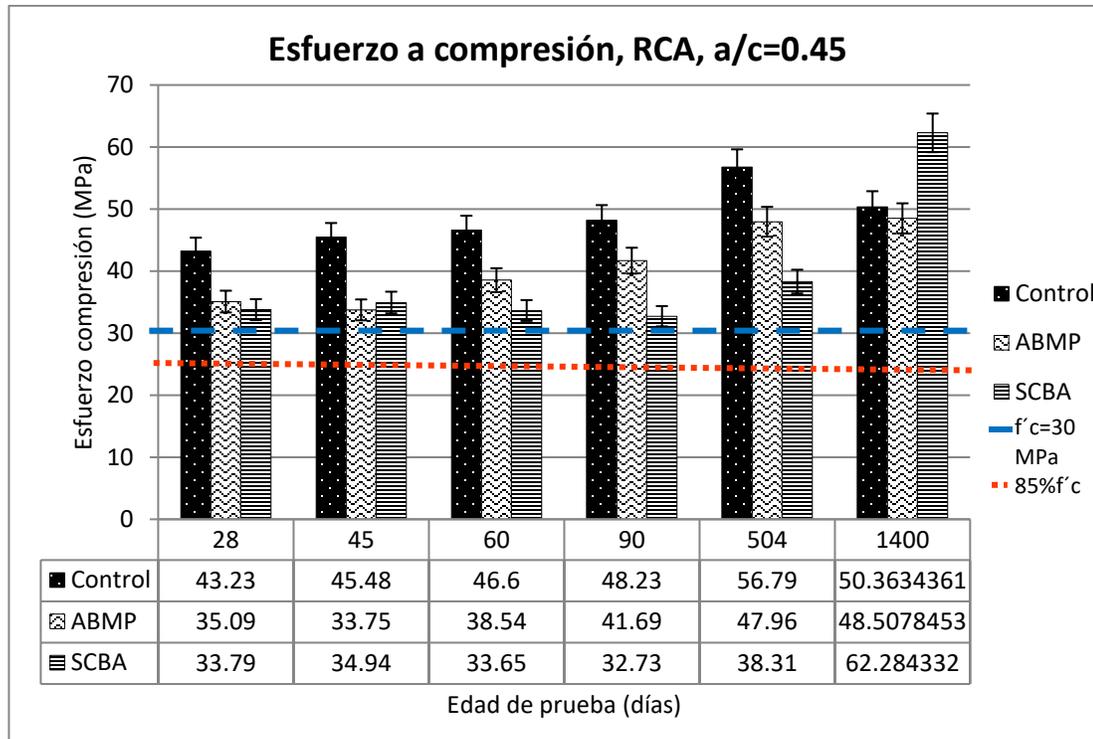


Gráfico 17. Comparación de resistencia de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación a/c=0.45.

Desde los 28 días hasta los 504 días de prueba, la mezcla control superó a las otras dos mezclas, aunque a los 1400 días fue superada por la mezcla con sustitución del 10% de SCBA-RCA relación a/c=0.45 con un  $f'c=62.3$ MPa. La mezcla con sustitución del 10% de ABMP-RCA relación a/c=0.45 se mantuvo en un constante crecimiento y se considera que tuvo un buen comportamiento al incrementar su  $f'c$ , y de igual forma superando a su  $f'c$  de proyecto.

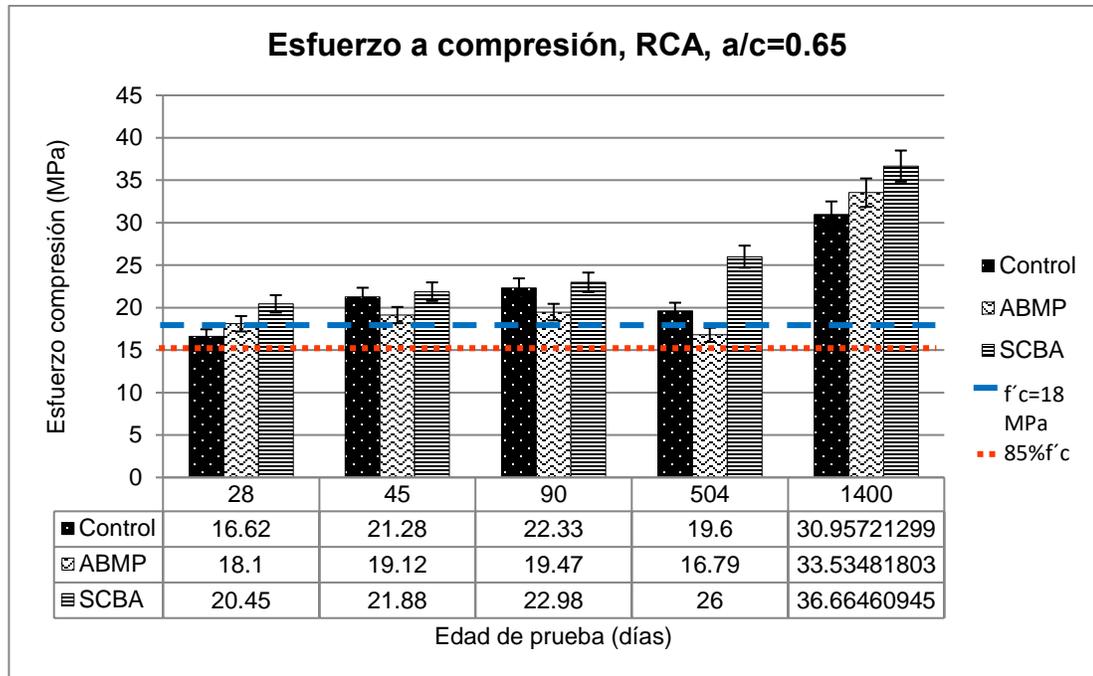


Gráfico 18. Comparación de resistencia de especímenes elaborados con agregado reciclado y relación a/c=0.65.

Los esfuerzos de compresión a edades tempranas superaron el  $f'_c$  de diseño=18MPa por las mezclas probadas a penas a los 28 días. A los 1400 días únicamente se encontraron especímenes de la mezcla control y que tiene una sustitución del 10% de ABMP-RCA relación a/c=0.65, siendo esta última la de mejores resultados, llegando a los 33.53MPa de resistencia a compresión.



### 4.3.2. Resultados del ensayo de Módulos de elasticidad estático.

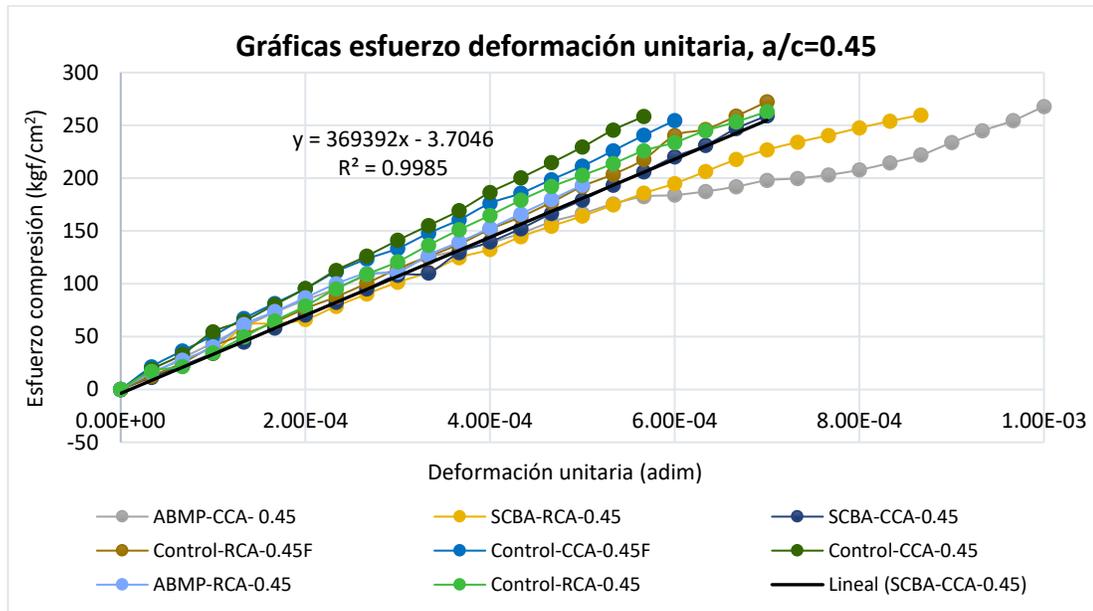


Gráfico 19. Curvas esfuerzo deformación de mezclas de concreto con relación a/c=0.45

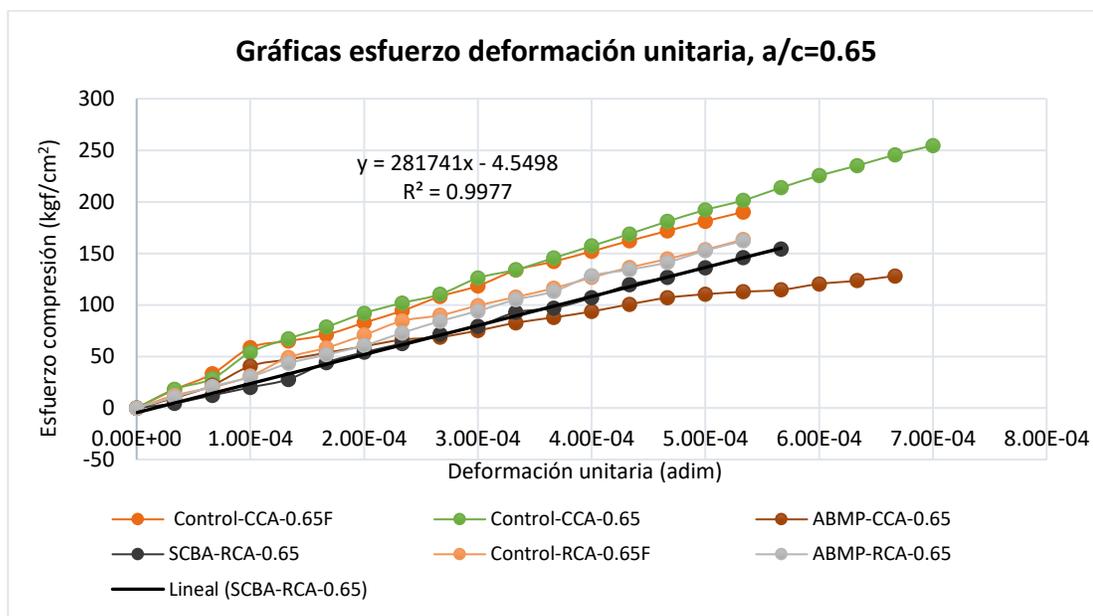


Gráfico 20. Curvas esfuerzo-deformación de mezclas de concreto con relación a/c=0.65

En el gráfico 19 y 20 se muestran las curvas esfuerzo deformación de las mezclas para las diferentes sustituciones con las relaciones a/c de 0.45 y 0.65.

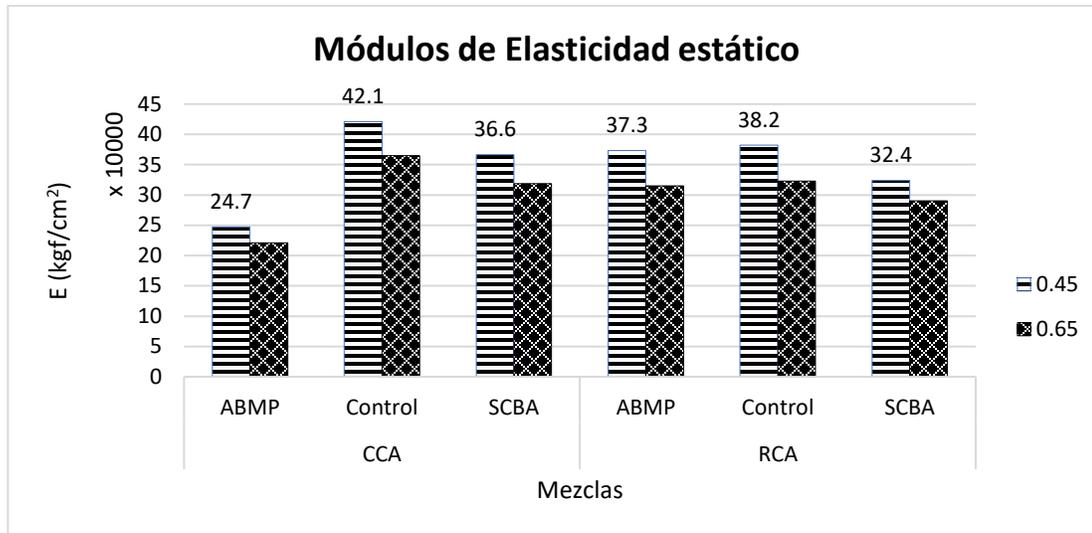


Gráfico 21. Valores de módulos de elasticidad (E) en cilindros de 10cm de diámetro y 20cm de altura.

Los módulos de elasticidad son muy similares entre ellos.

Siendo para la relación a/c=0.65 menores que las de la relación a/c de 0.45.

La mezcla con mayor módulo de elasticidad estático es la Control-CCA con relación a/c de 0.45.

Las mezclas con sustitución del 10% de ABMP presentan los menores valores para los módulos elásticos estáticos, indicando mayores deformaciones con menores esfuerzos aplicados.

#### 4.4. Resultados de Pruebas Electroquímicas (Corrosión)

##### 4.4.1. Resultados de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ )

En la tabla 46 nos indica la actividad de corrosión de acuerdo a los resultados de potenciales de corrosión.

Tabla 45. Relación entre  $E_{corr}$  y la actividad de corrosión. (NMX-C-495-ONNCCE-2015)

Potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) mV vs. Cu/CuSO <sub>4</sub>	Actividad de Corrosión
< -500	Corrosión Severa



< -350	90% de Probabilidad de Corrosión
-350 a -200	Incertidumbre
> -200	10% de Probabilidad de Corrosión

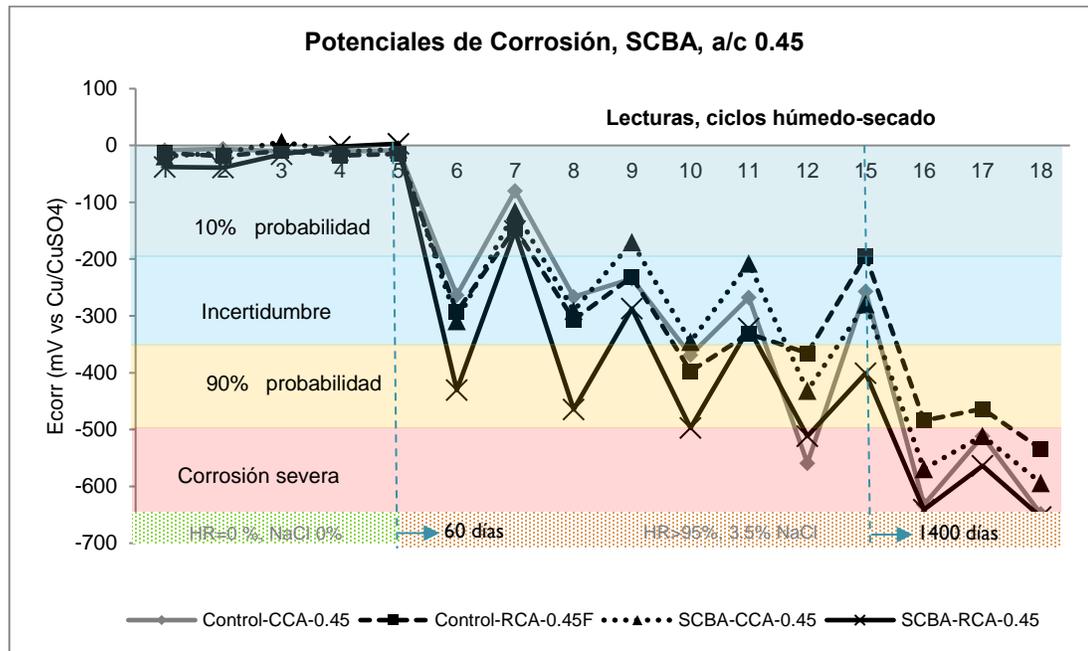


Gráfico 22. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de SCBA, relación a/c=0.45.

Los potenciales de corrosión medidos en la mezcla que contiene 10% de SCBA con una relación a/c=0.45 se muestran en el gráfico 23. En el ciclo 6 posterior al curado de las mezclas en agua corriente, se observa una reducción del potencial asociado a la exposición del espécimen en la solución de NaCl 3.5%. A partir de los 1400 días de curado, las lecturas de los potenciales estacionarios obtenidas indican para todos los casos una probabilidad de corrosión de 90% y “corrosión severa”, tanto en los ciclos de secos como en los húmedos. Las mezclas que redujeron en mayor medida su valor de potencial fueron las elaboradas con SCBA-RCA y relación a/c= 0.45 El acero embebido en la mezcla de concreto elaborado con SCBA-RCA presenta los potenciales más bajos en la reanudación de la prueba a los 1400 días. El acero en la mezcla Control-RCA presenta un menor decaimiento en los valores de



potenciales, al clasificarse en el primer ciclo dentro del rango de probabilidad de corrosión del 90%.

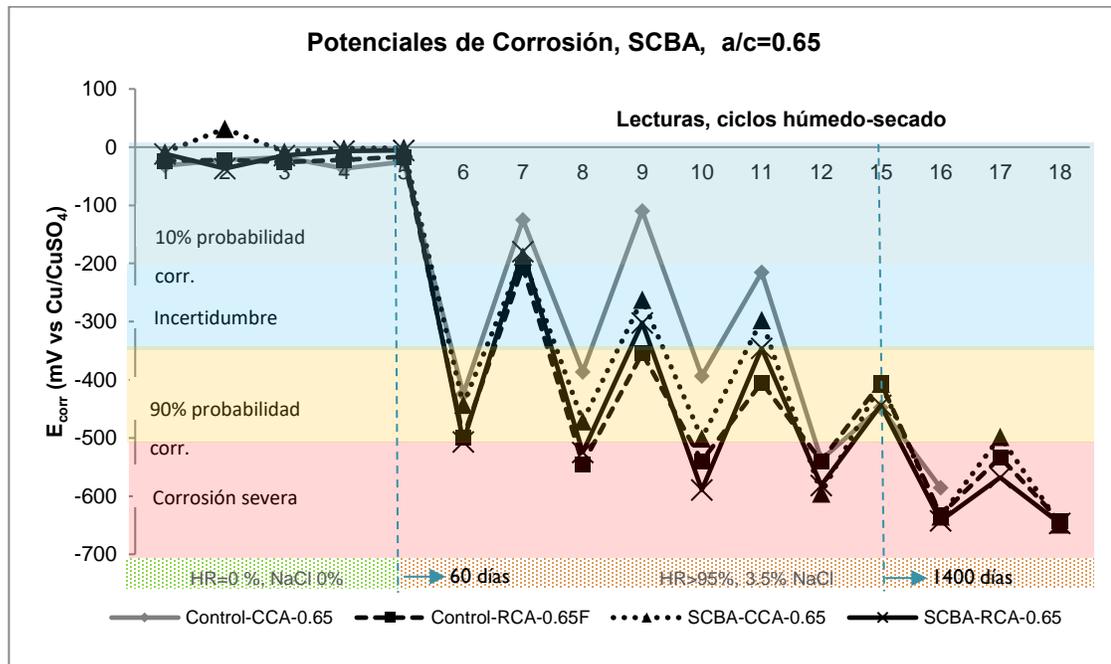


Gráfico 23. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de SCBA, relación a/c=0.65.

Así como con las otras probetas, se observa en el gráfico 24 la pasividad del acero en las cinco primeras pruebas, que corresponden al curado en agua común de las mezclas con sustitución del 10% de SCBA-RCA y SCBA-RCA, ambas con relación a/c=0.65. Después de los 60 días, cuando se realizó la exposición de los especímenes a la solución de NaCl 3.5%, se observa que la mezcla Control con CCA se mantiene en una zona de incertidumbre hasta la prueba número 11, con potenciales mayores que los medidos en los otros especímenes. Indican un estado de “corrosión severa” a partir del ciclo 16 (eso después de los 1400 días) los potenciales de media celda del acero embebido en cada mezcla.

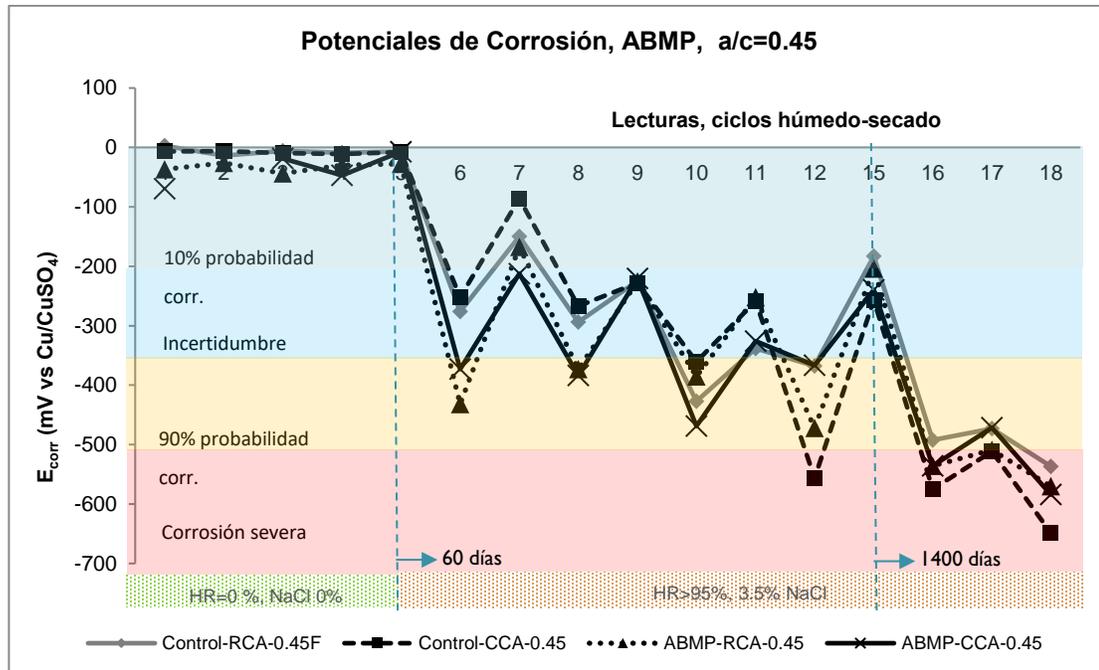


Gráfico 24. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de ABMP, relación a/c=0.45.

Después del curado de las mezclas hasta el ciclo 6 donde ocurre la pasivación del acero, es decir, valores mayores a -200mV, se observa la reducción de los valores de los potenciales en las mezclas con relación a/c de 0.45 y sustitución del 10% de ABMP, efecto asociado al proceso de despasivación del acero por exposición a cloruros. Al retomar el ensayo en el ciclo 16 (a los 1400 días de la elaboración de los especímenes) los potenciales aumentan ya que se probó en estado seco, y al someter los especímenes al ciclo húmedo por una semana en la solución del 3.5% de NaCl, de acuerdo con el criterio se establece que en el ciclo seco hay un “90% de probabilidad de corrosión” y en el ciclo húmedo llega a “corrosión severa”.

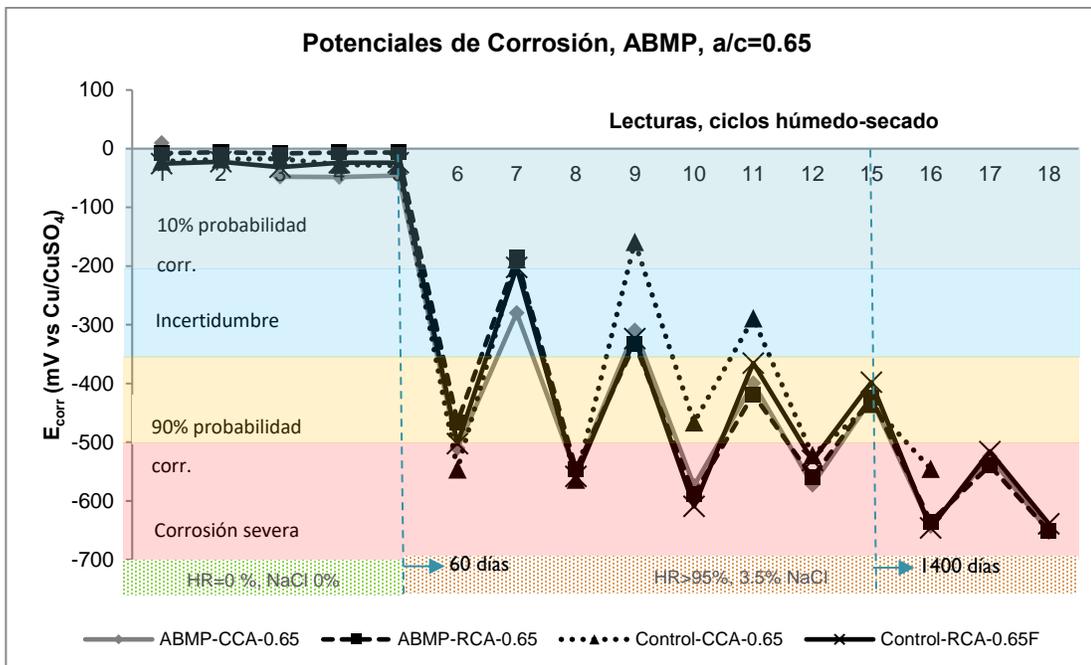


Gráfico 25. Potenciales de corrosión del acero grado 42 embebido en las mezclas de concreto endurecido. Adición de ABMP, relación a/c=0.65.

A diferencia de los potenciales obtenidos en las mezclas con ABMP, con relación a/c=0.45, los valores para la relación a/c=0.65 presentan una condición de corrosión severa desde la primera exposición a la solución NaCl 3.5%. En la prueba realizada a los 1400 días en estado seco no se mostró un incremento de los potenciales, sino una tendencia a reducirse, entrando en la clasificación de corrosión severa en las condiciones húmedo y seco, gráfico 25.

#### 4.4.2. Resultados de Velocidad de corrosión ( $i_{corr}$ )

Una clasificación de los valores de  $i_{corr}$  o velocidad de corrosión en términos de vida útil es la siguiente, tabla 47 (CYTED-DURAR, 1998)

Tabla 46. Clasificación de los valores de  $i_{corr}$  en términos de vida útil

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de Corrosión (mm/año)	Nivel de Corrosión
--	---------------------------------	--------------------



<0.1	<0.00116	Despreciable
0.1-0.5	0.00116 - 0.0058	Moderada
0.5 - 1	0.0058 - 0.0116	Elevada
>1	>0.0116	Muy Elevada

Los resultados que se verán a continuación se pueden clasificar en 3 etapas. La etapa 1, es la pasivación del acero que ocurre después del proceso de curado. La etapa 2, es cuando se comienzan los ciclos de humedecimiento y secado de las mezclas de concreto en la solución preparada con un 3.5% de NaCl a partir de los 60 días. La etapa 3, a partir de los 1400 días se reanudaron los ciclos con el objetivo de observar una posible pasivación del acero.

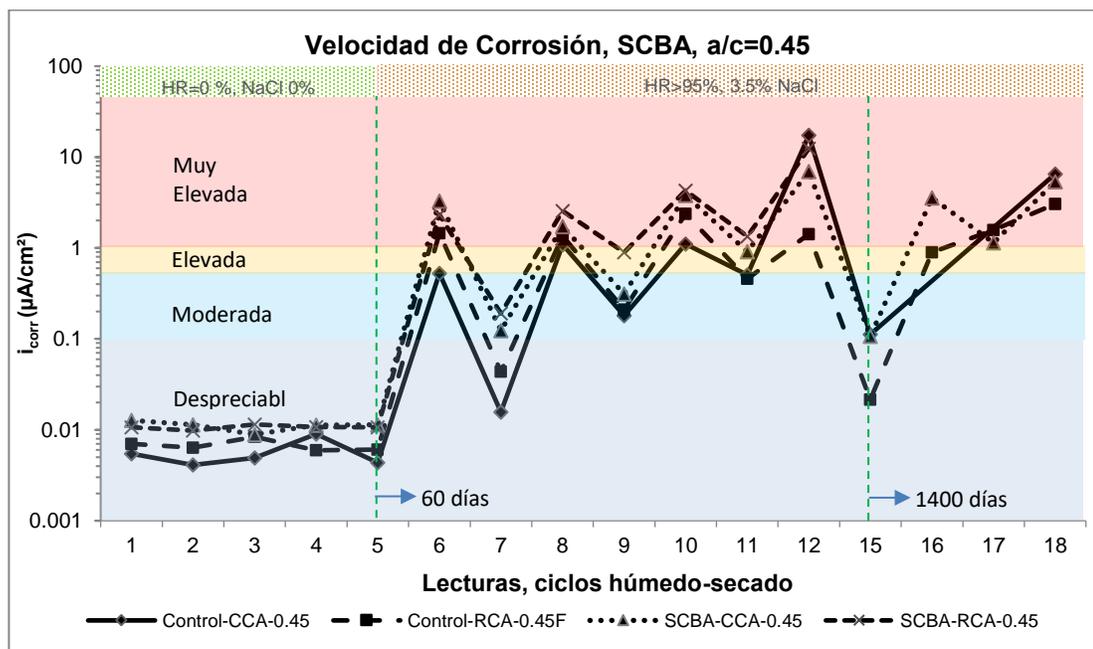


Gráfico 26. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de SCBA, relación a/c=0.45.

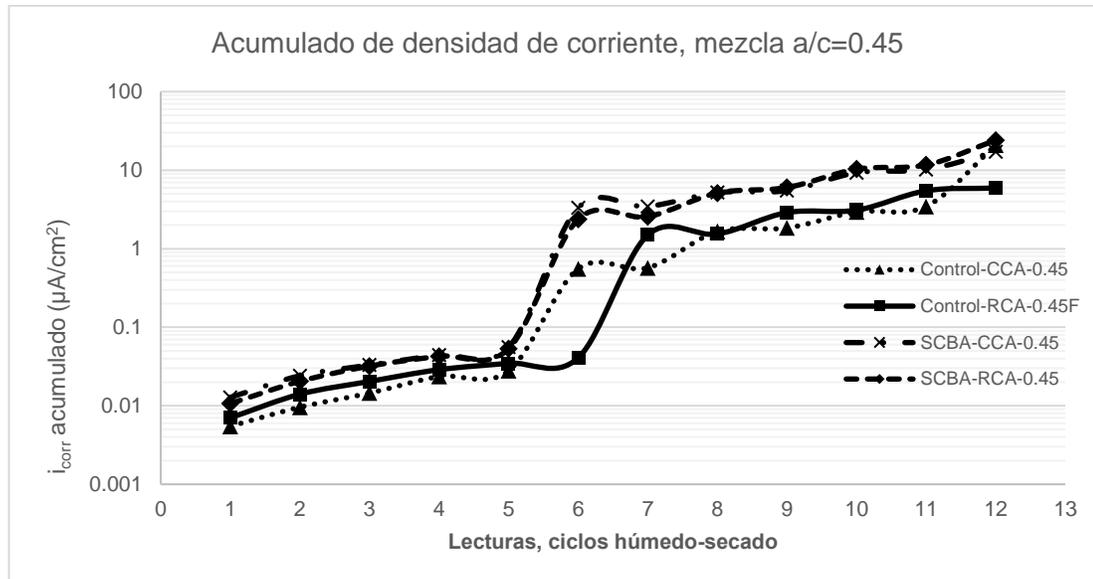


Gráfico 27. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución parcial de SCBA, relación  $a/c=0.45$

En el gráfico 26 se muestran los valores de  $i_{corr}$  calculados para cada ciclo húmedo y seco, de la mezcla SCBA con relación  $a/c$  de 0.45. Para agregado natural triturado (CCA) y para agregado de concreto reciclado (RCA). Los criterios de evaluación de la velocidad de corrosión que se describen en la tabla 47 se indican en cada gráfico para determinar de forma visual el nivel de corrosión en cada prueba. Los valores de  $i_{corr}$  se incrementan conforme se avanza en cada ciclo de prueba, de tal manera que en el tercer ciclo los valores para la muestra en estado seco y húmedo indican un nivel de corrosión elevado y muy elevado respectivamente. En la reanudación de las pruebas a 1400 días las velocidades de corrosión continúan con la misma tendencia previa.

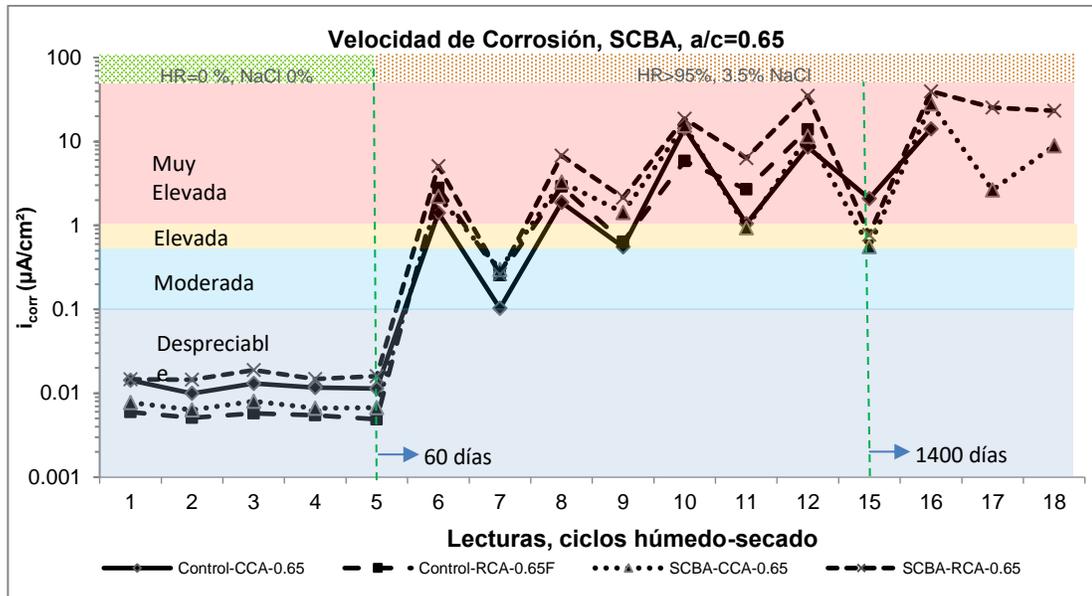


Gráfico 28. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de SCBA, relación  $a/c=0.65$ .

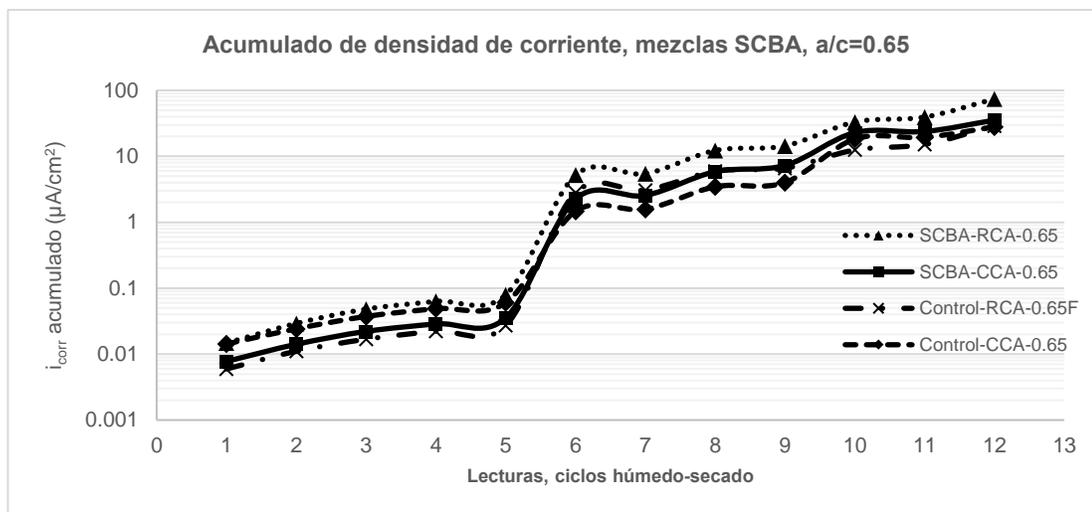


Gráfico 29. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución parcial de SCBA, relación  $a/c=0.65$ .

En el gráfico 28 se observa un incremento considerable en la densidad de corrosión del acero embebido en la mezcla de concreto con la sustitución de ceniza de caña y relación agua cemento de 0.65, en el primer ciclo de exposición a la solución salina. Para el tercer ciclo de humedecimiento y secado el criterio de evaluación indica una corrosión muy elevada. En la reanudación de la prueba a los 1400 días la tendencia de los valores continúa con valores mayores a  $1 \mu A/cm^2$ .

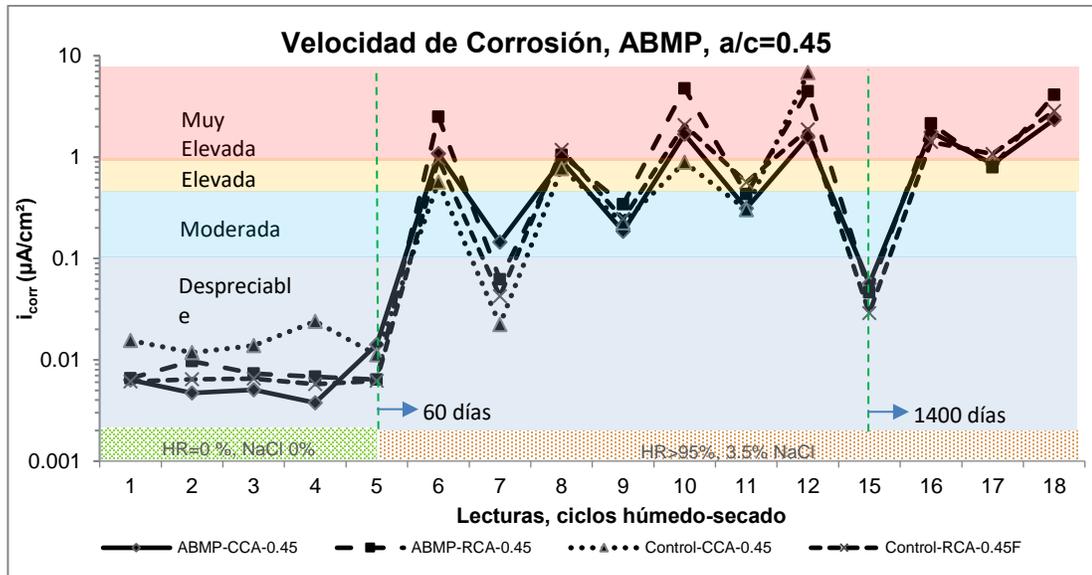


Gráfico 30. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de ABMP, relación  $a/c=0.45$ .

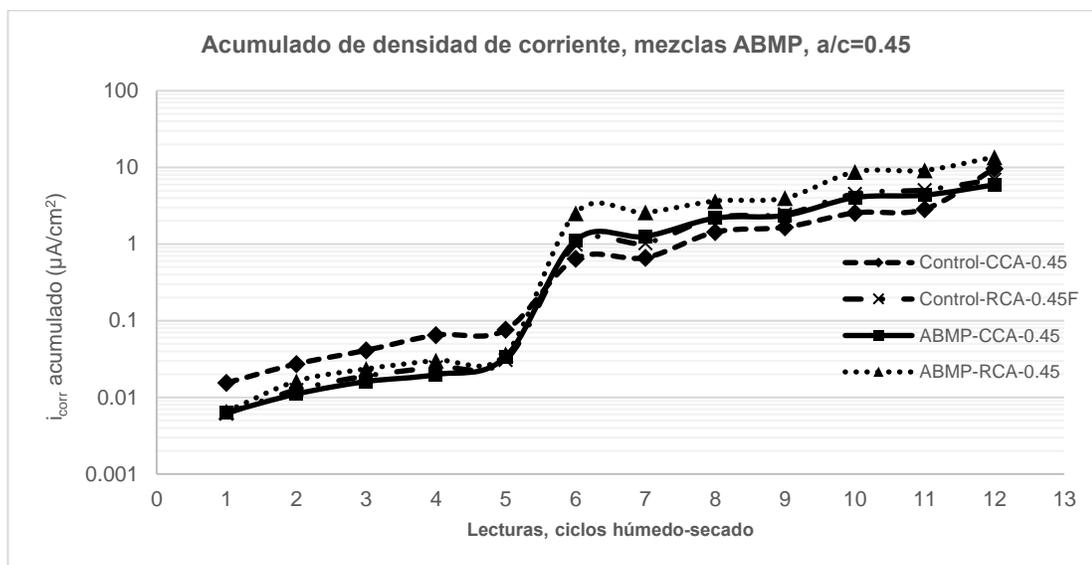


Gráfico 31. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución parcial de ABMP, relación  $a/c=0.45$ .

Las velocidades de corrosión del acero colocado en las mezclas de concreto con sustitución de ABMP y relación  $a/c=0.45$  se encuentran dentro de niveles de corrosión elevada a muy elevada, tal como se observa en el gráfico 30. Posterior a la reanudación de la prueba a los 1400 días, los valores de  $i_{corr}$  se mantienen con la tendencia.

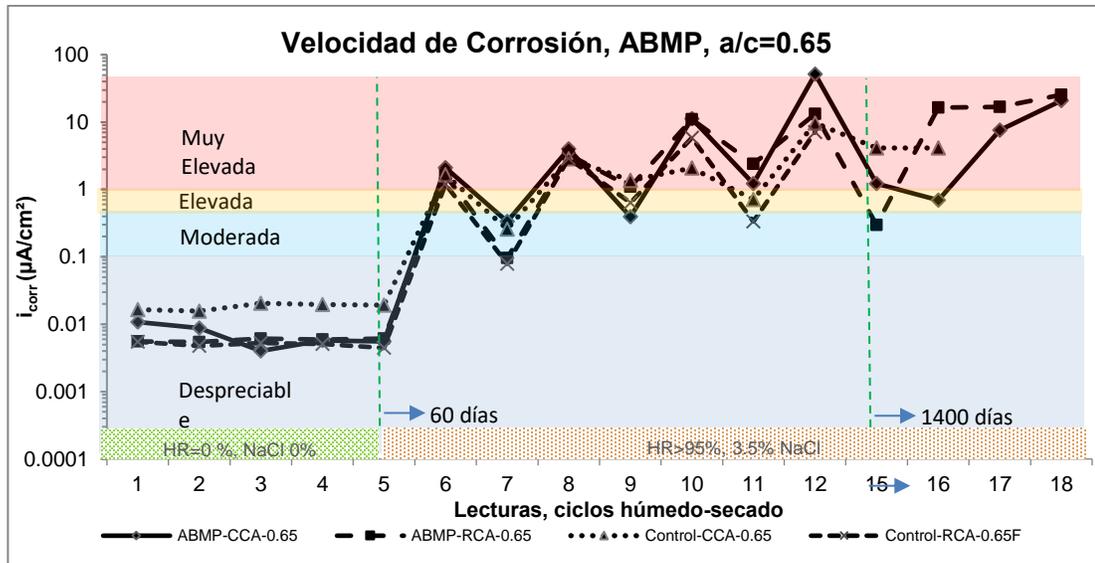


Gráfico 32. Velocidad de corrosión del acero grado 42, embebido en las mezclas de concreto endurecido, con sustitución de ABMP, relación  $a/c=0.65$ .

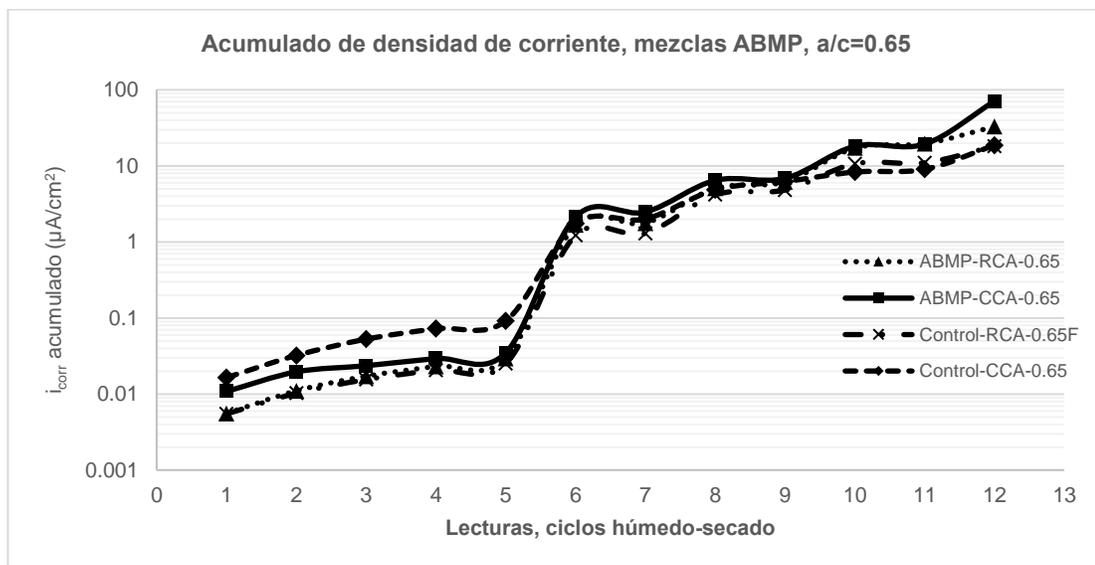


Gráfico 33. Acumulado de densidad de corriente de corrosión en mezclas con sustitución de ABMP, relación  $a/c=0.65$ .

Las velocidades de corrosión del acero colocado en las mezclas de concreto con sustitución del 10% de ABMP y relación  $a/c=0.65$  se encuentran dentro de niveles de corrosión elevada a muy elevada, tal como se observa en el gráfico 32.



## 5. Conclusiones

La arena volcánica cumple con los parámetros establecidos por la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018 por lo que se pudo emplear sin problema para la elaboración de las mezclas de estudio.

La grava CCA presentó muy buenos resultados, cumpliendo todos los parámetros de norma mexicana, con una granulometría dentro de los rangos establecidos; mientras que la grava RCA no cumple con los rangos. Esto puede atribuirse al triturado por quijadas al que fue sometido el producto de demolición, por lo que, es necesario hacer una compensación para los límites granulométricos al momento de que se utiliza este material. En este caso, con la arena y las sustituciones de cemento por cenizas puzolánicas pueden compensar la mala distribución granulométrica y de esa forma disminuir la porosidad de la matriz cementante. Es importante destacar que únicamente se sustituyó el 50% de la grava CCA por la grava RCA.

Para la resistividad eléctrica, la mezcla que demostró mejores resultados a la edad de 1400 días fue la de sustitución del 10% de SCBA-CCA con relación a/c de 0.65, con un valor de  $44\text{k}\Omega\text{-cm}$ , lo que indica que, aunque fue la mejor de todas, se le considera como una mezcla de “Porosidad de consideración” de acuerdo con la norma (NMX-C-514-ONNCCE-2016). Esto quiere decir que la sustitución con la ceniza puzolánica realmente mejoró las propiedades del concreto respecto a las muestras testigo (o Control). Los resultados difieren a los reportados en literatura, ya que generalmente las mezclas con una relación agua/cemento menor presentan mejores propiedades físicas mecánicas del concreto.

Los resultados en general de la prueba de frecuencia de resonancia longitudinal son mucho más bajos de los reportados en la literatura, esto se puede atribuir a que se trabajó con diferentes materiales, modificando el comportamiento dinámico del concreto hidráulico en estudio. Para comparar



los resultados con los reportados en otras investigaciones se sugiere realizar una revisión por geometría del espécimen.

Las mezclas con una relación a/c de 0.45 obtienen mejores resultados en la prueba de compresión simple. Entre ellas la que destaca como la mejor es la que contiene una sustitución del 10% de SCBA-CCA relación a/c=0.45 con valor de 64 MPa. Las mezclas con un agregado CCA tienden a una mayor resistencia a la compresión debido a que se trata de un agregado natural triturado, lo cual resulta en una característica que propicia altas resistencias por su baja porosidad. Mientras menor sea la relación a/c menor es la cantidad de vacíos, siempre y cuando se realice una correcta elaboración de los especímenes.

La prueba de Fagerlund arroja que la muestra con un menor índice de absorción (I), menor coeficiente de permeabilidad y menor porcentaje de porosidad efectiva, es la mezcla con una sustitución del 10% de SCBA-RCA con relación a/c=0.45. Por lo que se deduce que la ceniza es la que llena los poros, disminuyendo la absorción del espécimen y no permite que entren los agentes corrosivos al concreto, respecto a la mezcla control.

Las mezclas con relación agua/cemento de 0.45 obtuvieron mayores módulos de elasticidad estática. Siendo la mezcla Control-CCA relación a/c de 0.45 la que presenta mejores resultados. Quiere decir que, esta mezcla puede soportar un mayor esfuerzo antes de sobrepasar la zona elástica, haciendo posible que pueda recuperarse aún si se le aplica una mayor carga que al resto de mezclas., a diferencia con las mezclas con RCA que debido a la porosidad del concreto reciclado se deforman más con un esfuerzo menor.

Los valores para el potencial de corrosión de las mezclas con una relación agua/cemento de 0.65 tienden a ser menores que los observados en las mezclas con relación agua/cemento de 0.45. Las mezclas con relación a/c=0.65, al ser expuestas al cloruro de Sodio diluido en agua al 3.5%, debido a su naturaleza más porosa permite que dicho agente corrosivo ingrese hasta



llegar al acero de refuerzo reduciendo su concentración de iones ferrosos (NMX-C-495-ONNCCE-2015). Por lo tanto, para ambientes con exposición a humedad y una fuente externa de cloruros (NMX-C-530-ONNCCE-2018), se recomienda el diseño del concreto con relaciones agua/cementos menores a la 0.65.

En el ensayo a velocidad de corrosión, las mezclas con una relación agua/cemento de 0.45 obtuvieron resultados favorables, aunque llega a ser “muy elevada” en los últimos ciclos, sigue siendo menor a las mezclas con que se le compara. La mezcla sin sustituciones de ningún tipo, es decir, la mezcla Control-CCA relación a/c de 0.45 es la que mejor se comporta a lo largo de los ciclos de ensayo de humedecimiento y secado.

Al estar relacionadas las pruebas de potencial de corrosión y velocidad de corrosión, se comprueba con esta segunda prueba, que las mezclas con una relación agua cemento de 0.65 tienen una probabilidad mayor de corrosión en ambientes con exposición a humedad y una fuente externa de cloruros

## Bibliografía

- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CONCRETO-DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Construcción y Edificación, S.C.*
- ACI Committee 201. (June de 2008). Guide to Durable Concrete. *AMERICAN Concrete Institute*, 1-53. Recuperado el 10 de 2021, de [http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20201.2R-08%20Guide%20to%20Durable%20Concrete\\_MyCivil.ir.pdf](http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20201.2R-08%20Guide%20to%20Durable%20Concrete_MyCivil.ir.pdf)



ACI. (s.f.). CRITERIO GENERAL DEL DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE).

Águila, I., & Soso, M. (2008). Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos. *Revista de la facultad de ingeniería*, 23(4), 51-62.

Alvarado Alcazar, N. (2010). *Influencia de la Morfología de Pétreos: Volcánicos, Triturados y Cantos Rodados; correlacionando matemáticamente los Módulos de Elasticidad, Estático y Dinámico*,. (D. E. Guzmán, Ed.) Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 11 de 2021

Andrade, C., & González, J. (1978). Determinación electroquímica cuantitativa de la velocidad de corrosión de un acero de construcción. Evaluación de la susceptibilidad al ataque por picaduras. Parte II: ensayos en morteros. (C. S. Científicas, Ed.) *Materiales de Construcción*, 28(169).

Arqhys Construcciones. (12 de 2012). *Portal de arquitectura Arqhys.com*. Recuperado el 10 de 2021, de Analisis granulometrico de la arena.: <https://www.arqhys.com/construcciones/analisis-granulometrico-arena.html>.

ASTM C 618–03. (s.f.). “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

ASTM C 876-09. (s.f.). Standad Test Method for Corrsion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. *American Society for Testing and Materials*, 1-7.

ASTM-G102. (1999). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements1. *ASTM International*.



ASTM-G5. (2004). Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.

ASTM-G59. (2003). Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.

Bensted, J., & Barnes, P. (2002). *Structure and performance of cements*. New York: Spon Press; 2002.

Bernabé Reyes, C. (2012). *ADICIONES MINERALES DE ALTA TEMPERATURA A MORTEROS DE CEMENTO COMO MODIFICADORES DE COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO*. Morelia, Michoacán.

Bernabé Reyes, C. (2015). *EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON CENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN*. Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 2021

Best Practice Guidelines on the Preparation of Waste Management Plans for Construction & Demolition Projects. (2006).

Blancas Herrera, V. H. (2017). *EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA Y POR CRITERIOS DE DURABILIDAD DE MATRICES CEMENTICIAS CON SUSTITUCIONES ORGÁNICAS*. Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 2021

Bohác, M., & Gregerova, M. (2009). The influence of blast-furnace slag hydration products on microcracking of concrete. *Materials Characterization*, 729-734.

C. H. K. Lam, A. W. (2010). Use of Incineration MSW Ash: A Review” Sustainability. 1943-1968.

CANACEM. (2016). *Producción*. Obtenido de <https://canacem.org.mx/>



- Cement Sustainability Initiative CSI. (2012). *Global Cement Database on CO2 and Energy Information*. . Obtenido de <http://www.wbcscement.org>
- Chatveera a , B., & Lertwattanak, P. (2011). Durability of conventional concretes containing black rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 59-66.
- Christianson, S.A. de C.V. (s.f.). Crisotan R-5. Boletín Técnico.
- Cioffi R., M. L. (2003). Optimization of Geopolymer Synthesis by Calcination and Polycondensation of Kaolinitic Residue. *Resoruce Conservation and REcycling*, 40, 27-38.
- Concreto, I. d. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*.
- Concretos reciclados y eficiencia energética. (2014). *CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO*,, 29-31.
- CYTED-DURAR. (1998). En *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (SEGUNDA ed., pág. 128).
- CYTED-DURAR. (1998). *MANUAL DE INSPECCIÓN EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO* (2a ed.).
- Daube, J., & Bakker, R. (1986). Portland Blast furnace slag cement: a review. En F. G (Ed.). Philadelphia: Blended cements ASTM STP 897. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- de Brito, J., & Nabajyoti, S. (2013). Recycled Aggregate in Concrete. Use of industril, Construction and Demolition Waste. *Springer*.
- Diaz, C., & Rincon, J. M. (1990). Tratamiento quimico de la escoria de silice de una planta geotermica para su aplicacion en ceramica y vidrio. *Boletin de la Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 29, 181-184.



El hormigón. Clase construcción y Estructura Náutica. (2015). Obtenido de [https://wiki.ead.pucv.cl/images/5/5a/Clase\\_2\\_construcci%C3%B3n\\_1\\_n%C3%A1utica\\_2015\\_Hormig%C3%B3n.pdf](https://wiki.ead.pucv.cl/images/5/5a/Clase_2_construcci%C3%B3n_1_n%C3%A1utica_2015_Hormig%C3%B3n.pdf)

Escalante, J., Gómez, L., Johal, K., Mendoza, G., Mancha, H., & Méndez, J. (2001). Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions. *Cement and Concrete Research* 31, 1403–1409.

Escalante-García, J., Espinoza-Pérez, L., Gorokhovskiy, A., & Gómez-Zamorano, L. (2009). Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement. *Construction and Building Materials* 23, 2511–2517.

FICEM. (2013). *Federación Interamericana del Cemento*. Bogotá, Colombia.

Ganesan, K., & Rajagopa, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as corrosion resisting admixture for carbon steel in concrete. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 230-236.

García Chávez, J. (2019). *ADICIONES ECOLÓGICAS PARA INCREMENTAR LA VIDA ÚTIL DE OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO*. Morelia, Michoacán.

García Romero, D. (2021).

Gear, P. (s.f.). *GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PRODECENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN*. España.

Gomez-Zamorano, L. Y. (2004). *Geothermal waste as a replacement material of Portland cement pastes*. Saltillo, México: Cinvestav – Unidad Saltillo.



Gómez-Zamorano, L. Y., Escalante-García, J. I., & Mendoza-Suárez, G. (2004). Geothermal waste: An alternative replacement material of Portland cement. *Journal of materials science*, 39, 4021 – 4025.

Gómez-Zamorano, L., & Escalante, J. I. (Octubre-diciembre de 2009). Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina. *Materiales de Construcción*, Vol. 59, 296, 5-16.

González Castro, E. (2016). *MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y LA DURABILIDAD*. Morelia, Michoacán, México. Recuperado el 10 de 2021

González, J., Albéniz, J., & Feliu, S. (1996). Valores de la constante B del método de resistencia de polarización para veinte sistemas metal-medio diferentes. *Metalurgia*(32), 10-17.

Google Maps. (10 de 2021). *Google Maps*. Obtenido de Joyitas, Michoacán. 58335 Mich.: <https://www.google.com.mx/maps>

Hernández Toledo, U. I. (2010). *Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento*. Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México: Instituto Politécnico Nacional, centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional, unidad Oaxaca., Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales.

Hoffmann, C., & S. Schubert, A. L. (2012). Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material. *Construction and Building Materials*, 701-709.

IMT No 292. (2006). Publicación Técnica No 292. DURABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONCRETO REFORZADO EXPUESTA A



DIFERENTES AMBIENTES URBANOS DE MÉXICO. *IMT*. Recuperado el 11 de 2021, de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt292.pdf>

Ingenios Santos. (s.f.).

IPCC. (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jiménez, H. (12 de Julio de 2019). *La voz de Michoacán*. Obtenido de Impedirán elecciones de Tenencia Morelos, reiteran inconformes: <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/morelia/impediran-elecciones-de-tenencia-morelos-reiteran-inconformes/>

Jiménez, H. (20 de Diciembre de 2020). *La Voz de Michoacán*. Obtenido de Imágenes nuestras | Torre Médica del IMSS, figura emblemática para el recuerdo: <https://www.lavozdemichoacan.com.mx/michoacan/morelia-appmobil/imagenes-nuestras-torre-medica-del-imss-figura-emblematica-para-el-recuerdo/>

Kosmatka, Steven, H., & al., e. (2004.). Diseño y Control de Mezclas de Concreto. *boletín de ingeniería EB201, Portland Cement Association*(2797).

L, M. S. (2009). Study Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cement and Concrete Research*, 1033–1043.

Lauch, K.-S., Vrijders, J., & Dooms, B. (2018). Defining Limits for Standardization on Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregates. En D. Hordijk, & M. Lukovic, High Tech Concrete: Where Technology and Engineering. *Springer Internationa Publishing*, 2347-2355.



- Lee, W., & J.S.J., V. D. (2002). Effects of Anions on the Formation of Aluminosilicate Gel in Geopolymers. *Ind. Eng.Chem.Res*, 41, 4550-4558.
- Leung, C. K., Yu, J., & Mishra, D. K. (2017). Very high volume fly ash green concrete for application in Indian.
- Malhotra, V., & Mehta, P. (1996.). Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in Concrete Technology*.
- Manoharan, R., Jayabalan, P., & Palanisamy, K. (2009). Effect of chemical admixture on corrosion resistance of reinforced steel rods in concrete. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13–26.
- Marquez-Montero, & al, e. (2010.). Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBCA en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos. *ALCOMPAT*.
- Martinez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A.-G., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., & González-Valdéz, F. (2015). Concreto reciclado: una revisión. *ALCONPAT*, 235-248.
- Martinez-Reyes, J., Alavez-Ramírez, R., Montes-García, P., & Jiménez-Quero, V. (2010). Determinación microestructural del efecto puzolánico de una arcilla tratada térmicamente en la zona de interface-matriz en morteros. *X Congreso Nacional de Microscopía-Morelia*.
- Medina Custodio, O. (2006). *Tesis: Análisis del deterioro por corrosión microbiológica en un acero al bajo carbono*. México: UNAM.
- Moreno, A. D., López, T. P., & Madrid, M. M. (2001). “El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *IMT, Publicación Técnica*(182).
- Muciño Vélez, A., & Santa Ana Lozada, P. (2017). PRÁCTICA 9. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO. LEMSE (Laboratorio de Materiales y



Sistemas Estructurales). Recuperado el 2021, de [http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/05/180515\\_Practica9\\_W\\_LMSE.pdf](http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/05/180515_Practica9_W_LMSE.pdf)

Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, A. (2011). *ANÁLISIS DE MATERIALES* (Tercera ed.). Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Niccolás de Hidalgo.

NDT- JAMES INSTRUMENTS INC. NON DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS. (s.f.). *E-METER Resonant Frequency Tester*. Chicago, , Illinois, US.

Neville, A. (1997). *Properties of concrete*. New York: Wiley.

Newman, J., & Choo, B. (2003). *Advanced Concrete Technology Constituent Materials* ( First published ed.). (Butterworth-Heinemann, Ed.) imprint of Elsevier.

NMX-C-021-ONNCCE. (2015). *Industria de La Construcción - Cemento Para Albañilería (Mortero)- Especificaciones y Metodos de Ensayo*. México: ONNCCE.

NMX-C-030-ONNCCE-2004. (s.f.). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS-MUESTREO*.

NMX-C-057-ONNCCE-2015. (s.f.). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CEMENTANTES HIDRÁULICOS- DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL . Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C., 1-7.*

NMX-C-059-ONNCCE-2017. (s.f.). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CEMENTANTES HIDRÁULICOS-DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE FRAGUADO DE CEMENTANTES HIDRÁULICOS (Método Vicat). Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*



NMX-C-071-ONNCCE-2004. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – AGREGADOS –DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES. *Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-073-ONNCCE-2004. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS- MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-077-1997-ONNCCE. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS PARA CONCRETO- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO- MÉTODO DE PRUEBA. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-084-ONNCCE-2017. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS PARA CONCRETO-PARTÍCULAS MÁS FINAS QUE LA CRIBA 0.075MM (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-088-ONNCCE-2019. (s.f.). Industria de la Construcción-Agregados Pétreos- Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino- Método de ensayo. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-089-ONNCCE-1997. (s.f.). DETERMINACIÓN DE LAS QFRECUENCIAS FUNDAMENTALES, TRANSVERSAL, LONGITUDINAL Y TORSIONAL DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.

NMX-C-109-ONNCCE-2013. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CONCRETO HIDRÁULICO- CABECEO DE ESPECÍMENES. *Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C., 1-10.*



NMX-C-111-ONNCCE-2018. (s.f.). Industria de la Construcción- Agregados para Concreto Hidráulico- Especificaciones y Métodos de Ensayo. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.*, 1-17.

NMX-C-122-ONNCCE-2019. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGUA PARA CONCRETO- ESPECIFICACIONES . *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-128-ONNCCE-2013. (s.f.). DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LA RELACIÓN DE POISSON.

NMX-C-152-ONNCCE. (2015). *Industria de La Construcción - Cementantes Hidráulicos - Determinación de La Densidad.* México: ONNCCE.

NMX-C-152-ONNCCE-2015. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CEMENTANTES HIDRÁULICOS- DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-155-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Concreto Hidráulico-Dosificación en masa-Especificaciones y Método de Ensayo.* México: ONNCCE.

NMX-C-155-ONNCCE-2014. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CONCRETO HIDRÁULLICO- DOSIFICACIÓN EN MASA- ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO.

NMX-C-156-ONNCCE-2020. (s.f.). NDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CONCRETO HIDRÁULICO-DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo Nacional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*



NMX-C-159-ONNCCE-2016. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES EN EL LABORATORIO.

NMX-C-165-ONNCCE-2019. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-166-ONNCCE-2017. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS- CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-414-ONNCCE-2017. (s.f.). Industria de la Construcción- Cementantes Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Ensayo. 1-15.

NMX-C-480-ONNCCE-2014. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-GEOTECNIA-EQUIVALENTE DE ARENA DE AGREGADOS FINOS-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo NAcional de Normalización y certificación de la Costrucción y Edificación, S.C.*

NMX-C-495-ONNCCE-2015. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO-MEDICIÓN DE POTENCIALES DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO SIN REVESTIR, EMBEBIDO EN CONCRETO-ESPECIFICACIONES Y MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.*, 1-20.

NMX-C-504-ONNCCE-2015. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR EN CONCRETO HIDRÁULICO-MÉTODO DE ENSAYO. *Organismo Nacional de*



*Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.*,  
1-14.

NMX-C-514-ONNCCE-2016. (s.f.). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO- ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO.

NMX-C-530-ONNCCE-2018. (s.f.). *Industria de la Construcción- Durabilidad- Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado- Criterios y Especificaciones.*

Olin D. Whitescarver, I. W., & Kwan, J. T. (1990). *E.U. Patente nº 4900360.*

P. Chindaprasirt, C. C. (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, 356–361.

Ramezaniapour, A., Mahdi khani, M., & Ahmadibeni, G. (2009). The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes. *International Journal of Civil Engineering*, 83-91.

Rodgers, L. (17 de diciembre de 2018). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y quizá no conocías.* Recuperado el Octubre de 2021, de BBC NEWS: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>

Rodríguez Gómez, F. (2000). Resistencia a la Polarización. En D. I. Metalúrgica. UNAM.

Rodríguez Gómez, F. (2002). *Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión.* México: Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Química UNAM.

Roland Stulz, S. K. (1997). *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de soluciones potenciales revisado edición ampliado.* Londres: WC1B 4HH, UK: IT Publications.



- Rukzon, S., & Chindapasirt, P. (2009). Durability an Experimental Investigation of the Carbonation of Blended Portland Cement Palm Oil Fuel Ash Mortar in an Indoor Environment. *Indoor Built Environment*, 313-318.
- S. Marquez-Montero, e. a. (2010). «Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBCA en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos. *ALCOMPAT*.
- Song, H., & Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview. *Journal of Hazardous Materials*, 226–233.
- Toledo, U. I., Ramírez, R. A., & García, P. (2009). Cenizas de coco y hoja de pino para su uso como puzolana. *Naturaleza y Desarrollo*, 7(2):p. 34–45.
- Tórres Gómez, R., Aperador, W., Vera , E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). STUDY OF STEEL CORROSION EMBEDDED IN AAS. *Dyna*(164), 52-59.
- Tres G. , & E. Saborio. (2004). Corrosion Rate Evaluation of de Copper Cable Used in Grounding Systems at the ICE- Costa Rica . En *Portugaliae Electrochimica Acta* (págs. 345-360).
- Tsai, W., & Y.H. Chou. (2006.). An overview of renewable energy utilization from municipal solid waste (MSW) incineration in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 491–502.
- UCLM. (Julio de 2013). Obtenido de [http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin\\_informativo/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf](http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf)
- Vivian, T. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources Conservation & recycling*, 821-828.



“Evaluación de mezclas de Concreto Hidráulico con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña, Ceniza de Horno y Agregado Reciclado a edades tardías mediante pruebas de Durabilidad”



Zhang, S., Gong, K., & Lu, J. (2004). Novel Modification Method for Inorganic Geopolymer by Using Water Soluble Organic Polymers. *Materials Letters*, 58, 1292-1296.