



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“CONCRETO HIDRÁULICO CON SUSTITUCIÓN DE  
AGREGADOS FINOS POR PRODUCTOS PLÁSTICOS DE  
DESECHO PARA MODIFICAR SUS PROPIEDADES  
MECÁNICAS”

### TESIS PROFESIONAL

Para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

Presenta:

**P.I.C. FERNANDO HERNÁNDEZ CISNEROS**

Director:

**DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA**

Co director

**M.I. CIPRIANO BERNABE REYES**



Morelia, Michoacán. Septiembre del 2022



## Resumen

Este trabajo de investigación tiene como finalidad exponer la eficiencia, resistencia y viabilidad de un concreto hidráulico, el cual tiene una sustitución parcial de agregado fino por desechos plásticos triturados tomados como desperdicios de los vertederos a cielo abierto de las industrias de la región de Zacapu, Michoacán, México.

Se recolectó el plástico y se caracterizó por granulometría y densidad, de igual manera se obtienen los parámetros de calidad en los agregados pétreos y en el cemento, siguiendo los procedimientos de las normativas mexicanas (NMX) Posteriormente se realiza un diseño de mezclas de concreto hidráulico convencional con base en el criterio American Concrete Institute (ACI-318)

Se elaboraron los especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm y prismáticos de 15 x 15 x 60 cm, para evaluar a las diferentes edades de 7, 14, 28, 45 y 60 días, y comparar entre mezclas: Testigo PET (TP), sustitución 5% de la masa de la arena (FP-5%) y sustitución 10% de la masa de la arena (FP-10%).

Se realizaron pruebas al concreto fresco: Revenimiento y masa unitaria. En el concreto endurecido se evaluaron mediante pruebas destructivas: Compresión simple, tensión por compresión diametral, flexión y módulo de elasticidad estático; y no destructivas: Velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, frecuencia de resonancia y módulo de elasticidad dinámico.

Las mezclas con sustituciones plásticas se comportaron de manera adecuada respecto a la mezcla testigo, siendo la mezcla FP-5% la más semejante. Esta mezcla obtuvo una resistencia a la compresión simple mayor a los 250 kg/cm<sup>2</sup> a los 60 días de edad, alcanzando el 100% de la resistencia de proyecto esperada, mientras que la mezcla FP-10% obtuvo un 90% de resistencia respecto a la de proyecto.

El revenimiento de diseño fue de 15 cm y la resistencia de proyecto corresponde a un concreto de  $F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días. Resultando factible el uso del plástico triturado en la elaboración de concreto hidráulico para uso estructural y no estructural.

**Palabras clave:** Concreto hidráulico, PET, sustitución, pruebas destructivas, pruebas no destructivas.



## Summary

This research work aims to expose the efficiency, strength and viability of a hydraulic concrete, which has a partial replacement of fine aggregate by crushed plastic waste taken as waste from the open-air landfills of the industries of the region of Zacapu, Michoacán, Mexico.

The plastic was collected and characterized by granulometry and density, in the same way the quality parameters are obtained in the stone aggregates and in the cement, following the procedures of the Mexican regulations (NMX) Subsequently a design of conventional hydraulic concrete mixtures is made based on the American Concrete Institute criterion (ACI-318)

The cylindrical specimens of 10 x 20 cm and binoculars of 15 x 15 x 60 cm were elaborated to evaluate at the different ages of 7, 14, 28, 45 and 60 days, and compare between mixtures: PET control (TP), substitution 5% of the mass of the sand (FP-5%) and replacement 10% of the mass of the sand (FP-10%).

Tests were carried out on fresh concrete: Revenge and unit mass. In the hardened concrete, the following were evaluated by destructive tests: Simple compression, diametrical compression tension, bending and static modulus of elasticity; and non-destructive: Ultrasonic pulse rate, electrical resistivity, resonance frequency and dynamic elasticity modulus.

The mixtures with plastic substitutions behaved adequately with respect to the control mixture, with the FP-5% mixture being the most similar. This mixture obtained a simple compressive strength greater than 250 kg/cm<sup>2</sup> at 60 days of age, reaching 100% of the expected project resistance, while the FP-10% mixture obtained 90% resistance compared to the project.

The design revention was 15 cm and the project strength corresponds to a concrete of F'c = 250 kg/cm<sup>2</sup> at 28 days. It is feasible to use crushed plastic in the production of hydraulic concrete for structural and non-structural use.

**Keywords:** Hydraulic concrete, PET, substitution, destructive testing, non-destructive testing.

# Índice

RESUMEN .....	II
SUMMARY .....	III
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES. ....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
AGRADECIMIENTOS. ....	IX
<b>OBJETIVO. ....</b>	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1. CEMENTO. ....	6
2.1.1. <i>Antecedentes del cemento.</i> .....	6
2.1.2. <i>El cemento Portland.</i> .....	8
2.1.3. <i>Componentes del cemento Portland</i> .....	11
2.1.4. <i>Composición química del cemento</i> .....	12
2.1.5. <i>Características de los principales componentes del cemento Portland</i> .....	13
2.1.6. <i>Reacciones de clinkerización.</i> .....	14
2.1.7. <i>Tipos de cemento.</i> .....	15
2.2. AGREGADOS PÉTREOS. ....	18
2.2.1. <i>Arena.</i> .....	18
2.2.2. <i>Grava</i> .....	19
2.3. AGUA PARA CONCRETO.....	20
2.4. ADITIVOS PARA CONCRETO .....	24
2.5. PLÁSTICO .....	26
2.5.1. <i>Antecedentes del plástico.</i> .....	26
2.5.2. <i>Tipos de plásticos.</i> .....	28
2.5.3. <i>Composición química de los plásticos más comunes.</i> .....	30
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>
3.1. ORIGEN Y OBTENCIÓN DEL AGREGADO PLÁSTICO TRITURADO. ....	35
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS UTILIZADOS. ....	38
3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MOLDES Y PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO. ....	38
3.4. PRUEBAS EN CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO. ....	39
<b>4. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>40</b>
4.1. PRUEBAS EN AGREGADO FINO .....	40
4.1.1. <i>Cuarteo en arena.</i> .....	40
4.1.2. <i>Humedad actual en arenas.</i> .....	41
4.1.3. <i>Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.</i> .....	43
4.1.4. <i>Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)</i> .....	46
4.1.5. <i>Masa Volumétrica seca y varillada. (MVSV)</i> .....	47
4.1.6. <i>Granulometría en arenas y módulo de finura.</i> .....	49
4.1.7. <i>Densidad relativa de la arena.</i> .....	53
4.2. PRUEBAS EN AGREGADO GRUESO. ....	55
4.2.1. <i>Cuarteo en grava.</i> .....	55
4.2.2. <i>Humedad actual en gravas.</i> .....	56



## “Concreto hidráulico con sustitución de agregados finos por productos plásticos de desecho para modificar sus propiedades mecánicas”



4.2.3.	<i>Humedad de absorción en gravas.</i>	57
4.2.4.	<i>Densidad en gravas.</i>	59
4.2.5.	<i>Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)</i>	61
4.2.6.	<i>Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)</i>	63
4.2.7.	<i>Granulometría en gravas y tamaño máximo del agregado.</i>	65
4.3.	PRUEBAS EN EL CEMENTO	69
4.3.1.	<i>Consistencia normal del cemento</i>	69
4.3.2.	<i>Tiempos de fraguado del cemento.</i>	72
4.4.	DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO	74
4.4.1.	<i>Diseño por el método ACI (American Concrete Institute)</i>	75
4.5.	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS 10 X 20 CM	77
4.6.	ELABORACIÓN DE VIGAS DE CONCRETO DE 15 CM X 15 CM X 60 CM.	80
4.7.	CURADO DE LOS ESPECÍMENES.	81
4.8.	PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO	83
4.8.1.	<i>Determinación del revenimiento.</i>	83
4.8.2.	<i>Determinación de la masa unitaria.</i>	86
4.9.	PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN CONCRETO ENDURECIDO	89
4.9.1.	<i>Cabeceado de especímenes cilíndricos</i>	89
4.9.2.	<i>Velocidad de pulso ultrasónico en vigas y cilindros y módulo de elasticidad dinámico.</i>	91
4.9.3.	<i>Resistividad eléctrica.</i>	94
4.9.4.	<i>Frecuencia de resonancia en vigas y determinación del módulo de elasticidad dinámico de Young.</i>	97
4.10.	PRUEBAS DESTRUCTIVAS AL CONCRETO ENDURECIDO	99
4.10.1.	<i>Compresión simple en cilindros de concreto</i>	99
4.10.2.	<i>Tensión por compresión diametral.</i>	103
4.10.3.	<i>Módulo de elasticidad estático.</i>	105
4.10.4.	<i>Módulo de ruptura, Flexión en vigas.</i>	107
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>110</b>
5.1.	CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO.	110
5.1.1.	<i>Densidad en arena</i>	110
5.1.2.	<i>Humedad de absorción</i>	110
5.1.3.	<i>Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)</i>	110
5.1.4.	<i>Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)</i>	111
5.1.5.	<i>Análisis granulométrico.</i>	111
5.1.6.	<i>Módulo de finura</i>	114
5.2.	CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.	114
5.2.1.	<i>Densidad de la grava.</i>	114
5.2.2.	<i>Humedad de absorción</i>	114
5.2.3.	<i>Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)</i>	115
5.2.4.	<i>Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)</i>	115
5.2.5.	<i>Análisis granulométrico.</i>	116
5.3.	CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO.	119
5.3.1.	<i>Consistencia normal.</i>	119
5.3.2.	<i>Tiempos de fraguado</i>	119
5.4.	DISEÑO DE LAS MEZCLAS.	119
5.4.1.	<i>Diseño ACI</i>	119



5.5.	PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO.....	121
5.5.1.	<i>Revenimiento</i> .....	121
5.5.2.	<i>Masa unitaria</i> .....	121
5.6.	PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN CONCRETO ENDURECIDO.....	121
5.6.1.	<i>Velocidad de pulso ultrasónico en vigas y cilindros y módulo de elasticidad dinámico.</i> .....	121
5.6.2.	<i>Módulo de elasticidad dinámico.</i> .....	123
5.6.3.	<i>Resistividad eléctrica en vigas y cilindros.</i> .....	124
5.6.4.	<i>Frecuencia de resonancia.</i> .....	125
5.7.	PRUEBAS DESTRUCTIVAS EN CONCRETO ENDURECIDO. ....	126
5.7.1.	<i>Compresión simple en cilindros de concreto.</i> .....	126
5.7.2.	<i>Tensión por compresión diametral.</i> .....	127
5.7.3.	<i>Módulo de elasticidad estático.</i> .....	127
5.7.4.	<i>Módulo de ruptura por flexión.</i> .....	128
<b>6.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>129</b>
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	129
6.1.1.	<i>Agregados gruesos.</i> .....	129
6.1.2.	<i>Agregados finos.</i> .....	129
6.2.	CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO. ....	130
6.3.	PRUEBAS EN CONCRETO FRESCO.....	131
6.3.1.	<i>Revenimiento.</i> .....	131
6.3.2.	<i>Masa unitaria</i> .....	131
6.4.	PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS EN CONCRETO ENDURECIDO.....	131
6.4.1.	<i>Velocidad de pulso ultrasónico.</i> .....	131
6.4.2.	<i>Resistividad eléctrica.</i> .....	132
6.4.3.	<i>Frecuencia de resonancia en vigas</i> .....	132
6.5.	PRUEBAS DESTRUCTIVAS EN CONCRETO ENDURECIDO. ....	133
6.5.1.	<i>Compresión simple en cilindros de concreto.</i> .....	133
6.5.2.	<i>Tensión por compresión diametral.</i> .....	133
6.5.3.	<i>Módulo de elasticidad estático.</i> .....	134
6.5.4.	<i>Módulo de ruptura por flexión.</i> .....	134
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES. ....</b>	<b>135</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>136</b>



## Índice de ilustraciones.

Ilustración 1	Etapas en la producción tradicional del cemento Portland. ....	10
Ilustración 2	Fórmula química del polietileno de alta densidad .....	30
Ilustración 3	Fórmula química del polipropileno .....	31
Ilustración 4	Fórmula química del poliestireno .....	32
Ilustración 5	Fórmula química del cloruro de vinilo en proceso de polimerización formando el Cloruro de polivinilo.....	33
Ilustración 6	Fórmula química del Polietileno Tereftalato, PET.....	34
Ilustración 7	Ubicación del Parque Industrial Zacapu. Google maps .....	35
Ilustración 8	Recolección del material. ....	36
Ilustración 9	Material Plástico Triturado Desechado .....	36
Ilustración 10	Material plástico usado en las pruebas.....	37
Ilustración 11	Cuarteo del agregado fino .....	41
Ilustración 12	Muestra de arena en estado natural .....	42
Ilustración 13	Secado de la muestra de arena.....	42
Ilustración 14	Arena superficialmente seca.....	45
Ilustración 15	Troncocónico en arena .....	45
Ilustración 16	Masa del material.....	46
Ilustración 17	Arena enrasada en molde metálico.....	46
Ilustración 18	Material compactado y enrasado en el molde .....	48
Ilustración 19	Agitado de mallas por medio mecánico por 10 min. mínimo.....	51
Ilustración 20	Masa retenida por cada una de las mallas anteriormente mencionadas .....	51
Ilustración 21	Probeta con volumen y masa conocida y el agregado fino .....	54
Ilustración 22	Muestra superficialmente seca .....	54
Ilustración 23	A un lado se aprecia la muestra representativa de grava, al centro se observa el cuarteador mecánico.....	55
Ilustración 24	Colocación del vidrio para verificar que la muestra de grava está completamente seca .....	57
Ilustración 25	Muestra secada en parrilla eléctrica. ....	58
Ilustración 26	Muestra de grava que pasó la malla 3/4" y se retuvo en la malla 3/8" en estado saturado y superficialmente seco.....	58
Ilustración 27	Probeta graduada con el volumen total conocido añadiendo la masa de la muestra.....	60
Ilustración 28	Secado del material expuesto al calor del sol. ....	62
Ilustración 29	Determinación de la masa total de la muestra.....	62
Ilustración 30	Llenado del molde con la grava suelta.....	62



Ilustración 31	Llenado y varillado del molde con la grava seca .....	64
Ilustración 32	Determinando la masa total del recipiente lleno y enrasado .....	64
Ilustración 33	Juego de mallas y charolas para el cribado manual. ....	66
Ilustración 34	Aparato de Vicat para determinar la consistencia normal del cemento .....	71
Ilustración 35	Determinación del tiempo de fraguado por medio del aparato de Vicat .....	73
Ilustración 36	Elaboración de especímenes de concreto .....	80
Ilustración 37	Colado de especímenes prismáticos. ....	81
Ilustración 38	Curado de los especímenes cilíndricos y prismáticos .....	83
Ilustración 39	Muestra de concreto fresco .....	85
Ilustración 40	Medición del revenimiento .....	85
Ilustración 41	Llenado y compactado del cono Abrams .....	85
Ilustración 42	Determinación de la masa unitaria en el concreto fresco. ....	88
Ilustración 43	Cabeceado de los especímenes .....	90
Ilustración 44	Etiquetado de los especímenes .....	90
Ilustración 45	Grosor del azufre adecuado en el cabeceo. ....	91
Ilustración 46	Métodos de transmisión de la velocidad de pulso en el concreto tomado de la (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2020) .....	92
Ilustración 47	Prueba de velocidad de pulso ultrasónico en vigas .....	93
Ilustración 48	Prueba de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros .....	93
Ilustración 49	Montaje del espécimen para medir la resistividad real por método directo. ....	95
Ilustración 50	Resistometro marca Nilson usado en las pruebas. ....	96
Ilustración 51	Prueba de resistividad eléctrica en laboratorio. ....	96
Ilustración 52	Determinación de la frecuencia de resonancia por medio de ondas longitudinales. ....	98
Ilustración 53	Tipos de fallas en cilindros de concreto. ....	101
Ilustración 54	Ruptura de espécimen de concreto por efecto de la compresión ....	102
Ilustración 55	Especímen colocado en la maquina. ....	104
Ilustración 56	Especímen partido a la mitad por acción de la Tensión. ....	104
Ilustración 57	Ruptura del espécimen por carga diametral o Tensión indirecta .....	104
Ilustración 58	Determinación del módulo de elasticidad estático. ....	106
Ilustración 59	Ejemplo de un dispositivo de aplicación de carga para la prueba de resistencia a la flexión con carga a los tercios del claro. ....	108
Ilustración 60	Prueba de flexión en vigas .....	109
Ilustración 61	Curva granulométrica de la arena .....	113
Ilustración 62	Curva granulométrica de la grava .....	118
Ilustración 63	Velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas en cilindros .....	122



Ilustración 64	Velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas en vigas. ....	122
Ilustración 65	Módulo de elasticidad dinámico de las mezclas. ....	123
Ilustración 66	Resistividad eléctrica de las mezclas en cilindros. ....	124
Ilustración 67	Resistividad eléctrica de las mezclas en vigas. ....	124
Ilustración 68	Frecuencia de resonancia magnética en vigas. ....	125
Ilustración 69	Resistencia a la compresión de las mezclas. ....	126
Ilustración 70	Tensión por compresión diametral de las mezclas en cilindros. ....	127
Ilustración 71	Módulo de elasticidad estático de las mezclas en cilindros. ....	127
Ilustración 72	Módulo de ruptura por flexión en vigas. ....	128



## Índice de tablas

Tabla 1	Principales componentes químicos del cemento.....	12
Tabla 2	Fases principales del cemento Portland.....	14
Tabla 3	Tipos de Cemento .....	16
Tabla 4	Tipos de cemento de acuerdo a su clase resistente .....	17
Tabla 5	Características especiales de los cementos.....	17
Tabla 6	Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas .....	23
Tabla 7	Clasificación de los tipos de aditivos. ....	26
Tabla 8	Densidad promedio del material plástico .....	36
Tabla 9	Llenado de datos en el análisis granulométrico del agregado fino.....	50
Tabla 10	Límites granulométricos del agregado fino. ....	52
Tabla 11	Parámetros del porcentaje de absorción.....	59
Tabla 12	Formato para capturar datos de las MVSV y MVSS.....	64
Tabla 13	Operaciones para el cálculo de la granulometría en gravas. ....	67
Tabla 14	Límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa. .	68
Tabla 15	Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y T.M.A. ..	75
Tabla 16	Determinación de la relación agua/cemento .....	76
Tabla 17	Volumen del agregado grueso por volumen unitario de concreto. ....	77
Tabla 18	Valor nominal del revenimiento y sus tolerancias aceptables .....	86
Tabla 19	Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre. ....	90
Tabla 20	Velocidad de aplicación de carga .....	100
Tabla 21	Tolerancias permisibles en tiempo de prueba.....	101
Tabla 22	Densidad de la muestra de arena .....	110
Tabla 23	Humedad de absorción en arena.....	110
Tabla 24	Masa volumétrica seca y suelta en arena.....	110
Tabla 25	Masa volumétrica seca y varillada en arena.....	111
Tabla 26	Primer análisis granulométrico de la arena.....	111
Tabla 27	Segundo análisis granulométrico de la arena .....	112
Tabla 28	Porcentaje promedio de las granulometrías de la arena.....	112
Tabla 29	Límites granulométricos del agregado fino .....	113
Tabla 30	Módulo de finura de la arena.....	114
Tabla 31	Densidad de la muestra de grava.....	114
Tabla 32	Masa volumétrica seca y suelta de la grava.....	114
Tabla 33	Masa volumétrica seca y suelta de la grava (MVSS) .....	115
Tabla 34	Masa volumétrica seca y varillada de la grava (MVSV) .....	115
Tabla 35	Primer análisis granulométrico a la grava.....	116
Tabla 36	Segundo análisis granulométrico a la grava.....	116
Tabla 37	Porcentaje promedio de las granulometrías de la grava .....	117
Tabla 38	Límites granulométricos del agregado grueso.....	117
Tabla 39	Consistencia normal del cemento .....	119



Tabla 40	Tiempos de fraguado del cemento .....	119
Tabla 41	Datos para el cálculo del diseño de la mezcla .....	119
Tabla 42	Cantidades reales en masa por metro cúbico del diseño de ACI.....	120
Tabla 43	Dosificación de materiales para cada tipo de mezcla .....	120
Tabla 44	Revenimiento de las diferentes mezclas.....	121
Tabla 45	Masa unitaria del concreto fresco en las diferentes mezclas .....	121
Tabla 46	Criterio para la clasificación cualitativa de la calidad del concreto por durabilidad. .....	121



## Agradecimientos.

En primera instancia agradezco infinitamente a **MIS PADRES**, por todo su gran amor y apoyo que me han brindado incondicionalmente, por todo su trabajo y sacrificio que han hecho por mí, por su comprensión y compañía, por su atención y dedicación. Esto es por ustedes y para ustedes, gracias por ser unas personas maravillosas y las más importantes en mi vida. Gracias.

A **MIS HERMANOS, ERICK Y ADRIANA** porque han creído en mí y han estado en todo momento apoyándome desde el momento en el que inicie en la carrera. Gracias.

A **MI ABUELITO JESÚS** por sus grandes consejos que me han acompañado durante gran parte de mi vida, por todo su apoyo y comprensión, por enseñarme a trabajar como hombre justo y honesto, por creer y confiar en mí. Gracias.

A **MI ASESOR, DR, HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA**, por ser un excelente maestro y compartir sus conocimientos y su tiempo conmigo, por la dedicación que me brindó en todo momento y ante cualquier circunstancia, por el gran trabajo que ha hecho contribuyendo en la realización de este proyecto. Gracias.

A **MI Co ASESOR Y AMIGO DR, CIPRIANO BERNABE REYES**, por su gran ayuda que me brindó en el todo el proceso de la realización de esta investigación así también por sus conocimientos y todo su apoyo que recibí desde que cursaba los primeros semestres de la carrera, por su paciencia y su tiempo. Gracias.

A **LA DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMAN** porque es difícil encontrar a una persona tan maravillosa, atenta, amable y siempre dispuesta a colaborar y ayudar en todo lo que esté en sus posibilidades, porque siempre me recibió con los brazos abiertos en el laboratorio y con esa gran actitud positiva que empapa a todos los que tienen la suerte de coincidir. Gracias.



“Concreto hidráulico con sustitución de agregados finos por productos plásticos de desecho para modificar sus propiedades mecánicas”



**A MI AMIGA Y GRAN MAESTRA, DRA. SANDRA ARGUELLO HERNÁNDEZ** porque el conocimiento que tiene es tan amplio y su bondad tan grande que nunca dudo en enseñarme, ayudarme, aconsejarme y corregirme cuando lo necesitaba, por la paciencia y gran ayuda que siempre me brindo. Gracias.

**Al PERSONAL DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y CORROSIÓN**, porque me han brindado los conocimientos y el apoyo durante mi estancia en el laboratorio, por facilitarme los instrumentos y herramientas para mis pruebas, por su tiempo cada vez que recurría a ellos y por hacerme más ameno el tiempo que pasaba laborando. Gracias.

**A MIS MAESTROS** de la facultad de ingeniería, porque me han formado con el profesionalismo que los caracteriza, por compartir sus experiencias y conocimientos, por sus anécdotas y experiencias que poco a poco y de manera continua me han inspirado para seguir en la carrera. Gracias.



“Concreto hidráulico con sustitución de agregados finos por productos plásticos de desecho para modificar sus propiedades mecánicas”



*A mis padres...*

*Que lucharon por mi bienestar, mi educación y mi salud. No conozco a nadie en este mundo a quienes les deba más amor y agradecimiento.*



## Objetivo.

En México existen procedimientos y parámetros para controlar y normalizar la elaboración, calidad, resistencia y durabilidad del concreto, así como de los plásticos y envases que a diario son utilizados en grandes medidas por el hombre. Pero lamentablemente se tienen muy pocas regulaciones y leyes nulamente estrictas con las limitaciones necesarias en estas industrias para el tratamiento de sus desechos una vez estos hayan completado su vida útil, así como su reciclaje y/o rehúso. Esto también va ligado a la sobreexplotación de bancos de materiales y la contaminación que se produce desde su elaboración hasta su paradero final.

Al añadir plástico de desecho al concreto se estaría mitigando el impacto al medio ambiente evitando así su aparición en el suelo y por ende la contaminación de la atmósfera por la combustión de los gases que estos liberan al ser quemados como lo hacen en muchos lugares del país que no poseen un vertedero adecuado para su tratamiento. Al no poder detener el crecimiento poblacional, edificar con este concreto supondría un gran cambio a las nuevas generaciones.

Dicho lo anterior se pretende demostrar la factibilidad de uso en el comportamiento del concreto hidráulico reciclado sustituyendo parte de su agregado fino por el material plástico, para ello se elaboraron tres mezclas de concreto, una mezcla sin la sustitución de plásticos la cual llamamos mezcla “testigo”, otra mezcla con una sustitución del 5% de plástico triturado y por último una mezcla sustituyendo el 10% de su agregado fino, posteriormente se realizaron pruebas destructivas y no destructivas en el laboratorio a todas las mezclas obteniendo la comparativa de cada una de ellas y poder así determinar su comportamiento a los 7, 14, 28, 45 y 60 días.



# “Concreto reciclado con sustitución de agregados finos por productos plásticos desechados y triturados para modificar sus propiedades mecánicas”



## 1. Introducción

En México existe una gran demanda de concreto, misma que crece de manera exponencial año tras año, las cifras indican que se producen más de 20 millones de metros cúbicos de concreto, de los cuales no se recicla ni el 1%.

Ahora bien, para la elaboración de este concreto se debe primero elaborar el cemento que se le agregará, lo cual no es una tarea nada amigable para el medio ambiente. La producción mundial de cemento fue de 4,2 mil millones de toneladas en 2014, con una capacidad combinada de producir hasta 5,7 mil millones de toneladas. Este número se relaciona con la cantidad de Clinker producido, el ingrediente base del cemento.

Se estima que en México la producción anual de cemento es de 41 millones de toneladas, con un consumo de cemento de aproximadamente 325 kg por habitante por año (CANACEM, 2018) y un valor de cemento de aproximadamente 4.0 pesos por kg. El cemento Portland cubre el 80% de la producción de cemento, que es un cemento que consiste casi totalmente en Clinker y no reemplazos de cemento. Las obras de infraestructura gubernamental generan el consumo del 30-40% del cemento (Vazquez & Corrales, 2017). La producción de cemento en este país genera más del 4% de las emisiones totales de equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) similar al promedio mundial (Ernst Worrell, 2001).

En 2013, la producción de cemento en México liberó aproximadamente 20 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mientras que el uso de energía agregó 9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> más (SEMARNAT , 2015). La industria de la construcción produjo aproximadamente 6 millones de toneladas de residuos en promedio entre 2006 y 2012 del concreto, el 80% se depositó sin reutilización, del cual el 30% llegó a través de un centro de transferencia (CMIC, 2013).

En la Ciudad de México en 2010, la cantidad de residuos de construcción se estimó en 7 mil toneladas diarias, de las cuales el 1% se reciclaron y el 80% se vertieron en vertederos. En 2015, la Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México (SOBSE) recibió y procesó diariamente 33 toneladas de residuos de construcción y demolición, y 459 toneladas diarias en el Departamento de Mantenimiento e Infraestructura Urbana (DMIU) que se encuentra ubicado en cada delegación. En general, los residuos contenían un 70% de materiales inertes de origen mineral, como el concreto (SEDEMA, 2015), similar a las estadísticas de los Países Bajos.



En una encuesta que realizó el INEGI sobre la Industria Manufacturera y el Sistema Nacional de Cuentas Nacionales de México se obtuvo que anualmente se producen 41.6 millones de toneladas de cemento en el país, incluyendo el mortero y el cemento blanco, dando como resultado que México ocupe el lugar décimo tercero en producción de cemento a nivel mundial.

Parte importante de este proceso de fabricación del concreto son los agregados finos y gruesos, a grandes rasgos se puede deducir que la mitad de una mezcla de concreto es agregado fino o bien, arena. Esto es que para un metro cúbico de concreto hay aproximadamente  $0.5 \text{ m}^3$  de arena, lo cual hace que esta sea de mucha importancia en la elaboración de obras donde el concreto hidráulico sea el principal elemento.

Estos agregados se extraen de bancos de materiales, que son excavaciones a cielo abierto destinadas a extraer material para cualquier tipo de obra civil, así como para rellenos, taludes, ampliaciones, restauración ecológica, elaboración de concreto hidráulico y asfáltico, capas subyacentes o subrasantes, capas de pavimento etc. En ocasiones para la extracción de material se usan explosivos y artificios (SCT, 2000). Los cuales dañan también el medio destruyendo parte de la flora y fauna de la región donde es explotado el banco.

Por otro lado, se tiene también la problemática de la contaminación por el uso del plástico, este está en todas partes, en objetos de uso diario, insumos para la salud, nuestro calzado, accesorios, diversos utensilios para el trabajo u hogar, botellas para transportar líquidos, alimentos que pedimos para llevar, entre muchos otros (PROFECO, 2020). Los plásticos de un solo uso están por todas partes, los vemos en las calles de nuestras ciudades, bloqueando las alcantarillas, pero también en los rincones más lejanos y prístinos de nuestro planeta. Desde el hielo del Ártico en el polo norte, hasta la Fosa de las Marianas, una de las zonas más profundas del océano; desde el agua de lluvia hasta los cuerpos de las especies marinas que se alimentan de ellos, los plásticos inundan nuestros ecosistemas (Miguel Rivas, 2021)

Pero ¿Cómo se explica la invasión plástica? Los plásticos pueden recorrer largas distancias y transportarse de las zonas urbanas, donde generamos mayores cantidades de residuos, hasta nuestros océanos, a través del viento, el agua de lluvia, los ríos, por los drenajes, por acción directa de las personas (como cuando arrojamos basura en las playas), etc. Una vez en la naturaleza, los plásticos representan una grave amenaza para



los ecosistemas y para todas las especies que habitamos el planeta no importa donde se produzcan o donde se consuman. Por lo tanto, México no es ajeno a esta realidad.

La contaminación por plásticos tiene impactos negativos en los diferentes ecosistemas donde ha llegado y perdura por una cantidad de tiempo por lejos muy superior al tiempo de utilidad que brindaron dichos productos. Estos plásticos son fragmentados por la acción mecánica del viento, las olas o por la acción química de la degradación de sus materiales frente a la exposición a los rayos ultravioletas, produciendo micro plásticos que afectan a más de 700 especies, desde el plancton hasta la ballena azul, el animal más grande del planeta.

En el caso de los ambientes terrestres, se ha documentado que los micro plásticos presentes en los suelos generan problemas para las lombrices, disminuyendo su tiempo de vida y haciéndolas perder el 3% de su peso corporal cuando son expuestas a materiales como el polietileno de alta densidad, usado en envases y algunas bolsas. Esto tiene como consecuencia impactos negativos en la agricultura, vital para la soberanía alimentaria de México que es potencia agroalimentaria y ocupa los primeros lugares en exportación de aguacate, tequila o tomate.

En México habitan 6 de las 7 especies de tortugas marinas que existen en el mundo, todas ellas enlistadas en una categoría de riesgo bajo la legislación ambiental siendo estas especies altamente vulnerables a la contaminación por plásticos. Estudios demuestran que 1 de cada 3 tortugas muere a causa de este plástico y que el punto de inflexión se encuentra cuando las tortugas consumen más de 14 piezas plásticas, ahí los contaminantes tóxicos aumentan la tasa de mortalidad hasta el 50% de la población en las tortugas.

Además, es necesario tener en cuenta que a nivel mundial esta contaminación provoca la muerte de más de 100,000 mamíferos marinos al año y por lo tanto afectando a las 45 especies de mamíferos marinos mexicanos. Otras especies que se ven afectadas son las aves marinas, se calcula que el 90% ellas han consumido plástico el cual les causa la muerte por toxicidad e inanición y que en México representan el 5% de las especies de aves del país de acuerdo a la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.



En la actualidad los plásticos representan alrededor del 6% de las emisiones totales por uso del petróleo, sin embargo, los cálculos de su producción para el 2050 indican que representarán hasta el 20% del petróleo utilizado en el mundo, contribuyendo así a agravar la emergencia climática. Además, es necesario considerar que los productos plásticos continúan emitiendo gases de efecto invernadero como el metano o el etileno cuando se encuentran a la intemperie expuestos a la luz solar, por lo tanto, aún ya desechados continúan contribuyendo a aumentar la temperatura del planeta. El etileno utilizado en las bolsas de las tiendas de conveniencia es uno de los gases más contaminantes que resultan de usar estos productos llamados *commodities*.

La promesa del reciclaje es la forma en que la rueda siga girando y nunca haya un freno a las aspiraciones de aumentar indefinidamente el crecimiento del mercado del plástico. México no es la excepción y la industria utiliza el reciclaje del PET, el material que más se recicla en México, como un estándar asimilable a todos los demás tipos de plásticos, como si tuvieran igual éxito de ser reciclados. Sin embargo, en México la producción de botellas PET es de 90,000,000,000 al año, según (SEMARNAT , 2015) y aunque posee un alto valor de reciclaje, solo se recicle el 58% de ellos.

Lamentablemente, la mayor parte del reciclaje se basa en un sistema informal de recolección de los residuos, que vulnera los derechos básicos de quienes se dedican a esta actividad. En México el 67.3% de la actividad de reciclaje se apoya en este sector informal, mientras que la recolección en centros formales de acopio solo corresponde a 0.5%

Pese a esto existen empaques, envases y embalajes que nunca serán reciclados aun cuando estos posean la etiqueta de reciclaje, esto se debe a que para muchos de ellos no existe el mercado adecuado, es decir no se pagan precios competitivos, y por ende no son aceptados en los centros de acopio ni recolectados por las personas dedicadas a la pepena. Algunos envases como PET de multicapa o serigrafados, de colores exóticos (no transparentes), no son aceptados en la mayoría de los centros de acopio y lo mismo ocurre con envases plásticos que contienen tapas de silicón, aluminio o etiquetas metalizadas.



La mayoría de las bolsas o empaques de alimentos que tienen impresas las figuras de la marca y diferentes colores contienen mezclas de materiales que tienen un proceso de reciclado diferente, por lo cual su probabilidad de reciclaje es casi nula. Aunque no existen cifras oficiales, la industria del plástico en México menciona que los porcentajes de reciclaje en el país entre el 20% y el 30% sin hacer referencia a ninguna fuente oficial, solo de datos propios. Sin embargo, el Instituto nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó que el reciclaje de otros plásticos (exceptuando el PET) es fue de apenas 12.95% durante el 2014 (Miguel Rivas, 2021)

Derivado de todo lo anterior mencionado tenemos que hacer conciencia y empezar a implementar el uso de concretos reciclados ayudando a reducir una parte de toda esta contaminación que genera el proceso desde su elaboración hasta su desecho. Sustituyendo una parte de sus agregados por plástico se estará reduciendo una gran parte de todo este material que de forma irracional se va convirtiendo en un mal que a todos nos afecta y que poco a poco se convertirá en algo irreparable.



## 2. Marco teórico.

### 2.1. Cemento.

#### 2.1.1. Antecedentes del cemento.

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 A.C. y fue encontrado en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Yiftah en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida (cal viva, cal virgen), la cual cuando mezclada al agua y a la piedra, se endureció formando el concreto (Kosmatka, 2004).

En aproximadamente 2500 AC, se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide en Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes dicen que era un mortero de cal, mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por la quema de sulfato de calcio. En 500 AC, el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a la Grecia antigua. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes (conglomerantes) entre piedras y ladrillos y como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.

Fueron encontrados ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 AC. La palabra concreto es derivada del latín "concretus", que significa crecido junto o compuesto. Los romanos perfeccionaron el uso de puzolanas como material cementante. En un momento del siglo II AC, los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente. La descubierta tuvo un efecto importante en la industria de la construcción. El material no era arena, pero una ceniza volcánica fina, conteniendo sílice y alúmina, las cuales, combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico.

Los constructores de los famosos muros de Roma, acueductos y otras estructuras históricas, incluyendo el teatro en Pompeya (con capacidad para 20,000 espectadores), el Coliseo y el Panteón en Roma usaron este material.



Parece que la puzolana fue ignorada durante la edad media, cuando las prácticas de construcción eran mucho menos refinadas que las antiguas y la calidad de los materiales cementantes deteriorada. La práctica de calcinación de la cal y el uso de puzolanas no se usó nuevamente hasta el siglo XIV.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porque algunas calces poseían propiedades hidráulicas mientras que otras (aquellas producidas de calizas fundamentalmente puras) no las poseían. John Smeaton, frecuentemente llamado el "padre de la ingeniería civil en Inglaterra", concentró su trabajo en este campo. Descubrió que las calizas impuras y blandas, conteniendo materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos. Él ha empleado este cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del faro de Eddystone en el Canal de la Mancha, sudoeste de Plymouth, Inglaterra. El proyecto llevó tres años para que se terminara y la operación comenzó en 1759. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente.

La diferencia entre la cal hidráulica y el cemento natural es función de la temperatura alcanzada durante la calcinación. Además, una cal hidráulica puede hidratarse en una forma de "terron", mientras que los cementos naturales deben ser finamente molidos antes de la hidratación. El cemento natural es más resistente que la cal hidráulica, pero menos resistente que el cemento portland. El cemento natural se fabricó en Rosendale, Nueva York en el inicio del siglo XIX y se empleó en la construcción del canal Erie en 1818 (Kosmatka, 2004)

El desarrollo del cemento portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. La invención del cemento portland se atribuye normalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés. En 1824, obtuvo la patente para este producto, al cual lo nominó cemento portland pues producía un concreto con color semejante a la caliza natural que se explotaba en la isla de Portland en el Canal de la Mancha. Este nombre permanece hasta hoy y se usa en todo el mundo, con la adición de las marcas y nombres comerciales de sus productores.



Aspdin fue el primero a prescribir una fórmula para el cemento portland y el primero a patentarlo. Sin embargo, en 1845, I. C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había "quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó", produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos. Este cemento se volvió la elección popular en la mitad del siglo XIX y se exportó de Inglaterra para varias partes del mundo. La producción también empezó en Bélgica, Francia y Alemania aproximadamente en el mismo periodo y la exportación de estos productos de Europa para los Estados Unidos comenzó en 1865. El primer embarque de cemento portland para los EE.UU. fue en 1868. El primer cemento portland producido en EE.UU. se fabricó en una planta en Coplay, Pensilvania, en 1871. La producción de cemento en Latinoamérica empezó al final del siglo XIX y principio del siglo XX en México comenzó en 1907.

### 2.1.2. El cemento Portland.

El cemento portland se produce por la pulverización del Clinker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El Clinker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele juntamente con el Clinker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

La ilustración 1 muestra las etapas de la fabricación del cemento. Como las operaciones de las plantas de cemento no son básicamente iguales, no se pueden ilustrar adecuadamente por un mismo gráfico todas las plantas. No hay instalaciones típicas para la producción del cemento; cada planta tiene diferencias significantes en disposición, equipos o apariencia general.



Las materias primas seleccionadas se transportan de la cantera y se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada. La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquistos) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares.

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite nuevo o reciclado, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) se fuerza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en Clinker, formando pelotitas grises con tamaño predominante de canicas.

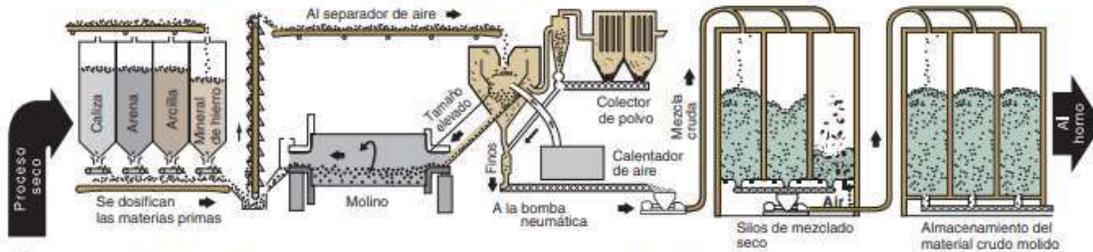
Después de esto, el Clinker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las propiedades de retracción y el desarrollo de resistencia. En el molino, el Clinker se muele finamente pasando por un tamiz de 45 micrómetros (malla no. 325) (Kosmatka, 2004)



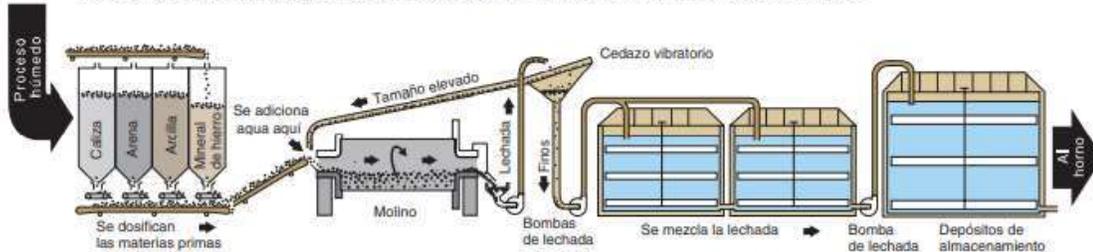
“Concreto hidráulico con sustitución de agregados finos por productos plásticos de desecho para modificar sus propiedades mecánicas”



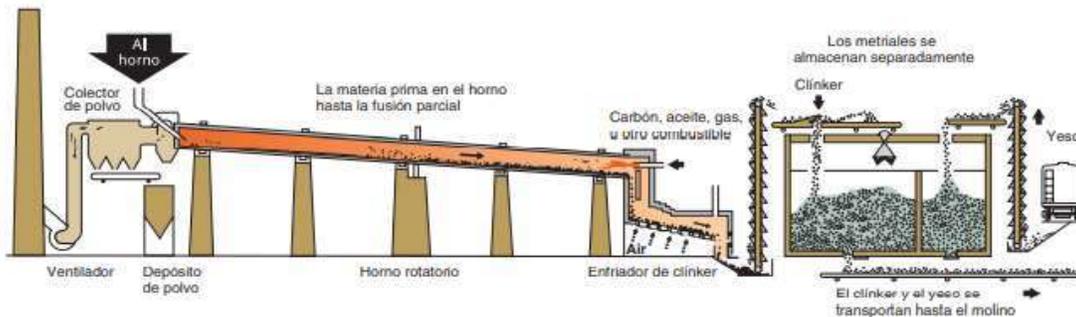
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces se almacenar.



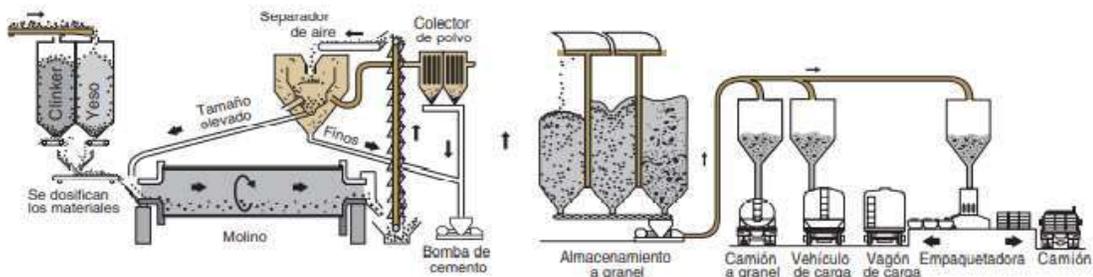
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



2. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada y se mezclan



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento.



4. Se muele el clínter junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Ilustración 1 Etapas en la producción tradicional del cemento Portland.



### 2.1.3. Componentes del cemento Portland

El cemento portland no es un compuesto químico sencillo, es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos totalizan 90% o más del peso del cemento portland: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (aluminio ferrito tetracálcico). Además de estos compuestos principales, muchos otros desempeñan un papel importante en el proceso de hidratación. Cada tipo de cemento Portland tienen los mismos cuatro compuestos principales, lo único que cambia son las diferentes proporciones.

Cuando se examina el Clinker (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento portland) al microscopio, la mayoría de sus compuestos individuales se puede identificar y sus cantidades se pueden determinar. Sin embargo, los granos más pequeños no se pueden detectar visualmente. El promedio del diámetro de las partículas de un cemento típico es aproximadamente 15 micrómetros. Si todas las partículas tuviesen este diámetro promedio, el cemento portland contendría aproximadamente 300 billones de partículas por kilogramo, pero en realidad, existen unos 16,000 billones de partículas por kilogramo, debido a la amplia variación del tamaño de las partículas. Las partículas en un kilogramo de cemento portland tienen un área superficial de aproximadamente 400 metros cuadrados.

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen 75% peso del cemento portland, reaccionan con el agua para formar dos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (hidrato de silicato de calcio). Este último es, sin duda, el más importante compuesto del concreto. Las propiedades de ingeniería del concreto - fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional - dependen principalmente del silicato de calcio hidratado. Éste es el corazón del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es un tanto variable, pero contiene cal ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en una proporción de 3 para 2. El área superficial del silicato de calcio hidratado es unos 300 metros cuadrados por gramo. En pastas endurecidas de cemento, el silicato de calcio hidratado forma un vínculo denso entre las otras fases cristalinas y los granos de cemento aún no hidratados; también se adhiere a los granos de arena y a los agregados gruesos, cementándolo todo junto.



Mientras el concreto se endurece, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, los cuales no tienen resistencia. La resistencia está en las partes sólidas de la pasta, sobre todo en el silicato de calcio hidratado y en los compuestos cristalinos (Kosmatka, 2004).

#### 2.1.4. Composición química del cemento

El Clinker de cemento portland es producido a partir de una mezcla de materiales crudos que contiene principalmente calcio, sílice, aluminio y hierro. Cuando esta mezcla posee la composición correcta, y es calentada hasta la temperatura de clinkerización o sinterización ( $1450^{\circ}\text{C}$ ), se forman nuevos minerales con propiedades hidráulicas los cuales dentro del horno tienen un mayor contacto entre sus componentes los cuales son:

*Tabla 1 Principales componentes químicos del cemento*

Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ); “C”
Óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ); “S”
Óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); “A”
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); “F”



### 2.1.5. Características de los principales componentes del cemento Portland

#### 1) Cal - Calcio - Oxido de calcio - “C”

La cal fue el aglomerante clásico de la antigüedad. Es probable que su descubrimiento haya sido a partir de la observación de los siguientes hechos: Piedra caliza + calor, da como resultado la “Cal viva” a su vez, la Cal viva + agua, produce “Cal apagada” lo que proporciona endurecimiento.

El mortero de cal es un material de resistencia relativamente baja, pero de gran elasticidad.

#### 2) Oxido de Silicio - Sílice - “S”

El óxido de silicio es el mineral más abundante de la corteza terrestre, estando presente en la mayoría de las rocas bajo diferentes formas cristalinas. Cuando se presenta como cuarcita, arena de cuarzo, arenisca, se encuentra bajo una forma no reactiva. Es completamente insoluble en agua, y resistente al ataque de los ácidos (excepto el ácido fluorhídrico). En algunos casos, en que naturalmente se presenta finamente dividida, como en la calcedonia, en el ópalo y en la tierra de diatomáceas, presenta una reactividad importante.

Finalmente, algunas tierras de origen volcánico (puzolanas) presentan sílice naturalmente reactiva. Sin embargo, también es posible transformarla en reactiva artificialmente, mediante el sometimiento a altas temperaturas.

#### 3) Alúmina - Oxido de aluminio - “A”

La alúmina está presente en la mayoría de las arcillas, mezclada con otros componentes, fundamentalmente sílice y óxido férrico. El material natural más rico en alúmina es la bauxita, compuesta mayoritariamente por óxido de aluminio hidratado



#### 4) Oxido férrico - “F”

El óxido férrico es el integrante más importante de los minerales férricos. También las arcillas contienen cantidades más o menos elevadas de este óxido, por lo que se presenta como un compuesto siempre presente en los cementos hidráulicos (excepto en el caso del cemento blanco que debe estar prácticamente exento del mismo).

#### 2.1.6. Reacciones de clinkerización.

El proceso de formación de Clinker, implica varias etapas en las que el material crudo va sufriendo transformaciones muy importantes que permiten la obtención de un producto con las propiedades deseadas. Cuando el calcio reacciona con el sílice, se forman compuestos con propiedades hidráulicas, llamados silicatos cálcicos, cuya composición final depende de las condiciones de reacción. Para que esta transformación ocurra, por fusión parcial de la mezcla, se requieren temperaturas muy elevadas (1900 °C). Por este motivo, se utilizan materiales correctores o fundentes, que permiten que la fusión ocurra a temperaturas menores. Así, cuando se alcanzan temperaturas superiores a 1250 °C comienza a producirse la fusión parcial de la mezcla que permite la reacción del calcio con el sílice, la alúmina y el óxido férrico, para formar los minerales o fases del Clinker.

Este conjunto de reacciones en fase semisólida se denominan reacciones de sinterización o clinkerización. Estas son:

*Tabla 2 Fases principales del cemento Portland*

$2C + S = C_2S$	También llamada: Belita (Silicato dicálcico)
$C_2S + C = C_3S$	También llamada: Alita (Silicato tricálcico)
$4C + F + A = C_4AF$	También llamada: Felita (Ferroaluminato tetracálcico)
$3C + A = C_3A$	También llamada: Celita (Aluminato tricálcico)



Las características para el desarrollo de la resistencia del cemento dependen principalmente de la alita y la belita, las cuales constituyen alrededor del 75% del cemento (Neville, 1999). La alita ( $C_3S$ ) endurece con rapidez por lo que afecta directamente el tiempo de fraguado y a la resistencia temprana. Por otra parte, la belita ( $C_2S$ ) reacciona lentamente con el agua y durante los primeros 28 días contribuye poco a la resistencia mecánica.

La celita ( $C_3A$ ) por el contrario, reacciona rápidamente con el agua y puede causar fraguado rápido, indeseable a menos que se emplee un agente como el yeso.

Por último, la ferrita ( $C_4AF$ ) reacciona con velocidad variable.

Aproximadamente un 95% del Clinker está compuesto por una mezcla de los cuatro minerales,  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ , mientras que el resto está constituido por cal libre ( $CaO$  libre), óxido de magnesio ( $MgO$ ) y sulfatos alcalinos.

#### 2.1.7. Tipos de cemento.

La norma (NXM-C-414-ONNCCE-2017 , 2017) menciona que en México existen seis tipos de cemento, estos se clasifican por sus componentes, por su resistencia a la compresión y por sus características especiales.

Tipos de cemento de acuerdo a sus componentes:

- Cemento portland con escoria granulada de alto horno: Es el cemento que resulta de la integración principalmente de escoria granulada de alto horno, Clinker portland y sulfato de calcio.
- Cemento portland ordinario: Es el cemento producido a base de la molienda de Clinker portland y usualmente sulfato de calcio.



- **Cemento portland compuesto:** Es el cemento que resulta de la integración de Clinker portland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser componente único.
- **Cemento con escoria granulada de alto horno:** Es el cemento que resulta de la integración de escoria granulada de alto horno, Clinker portland y sulfato de calcio.
- **Cemento portland con humo de sílice:** Es el cemento que resulta de la integración de Clinker portland, humo de sílice y sulfato de calcio.
- **Cemento portland puzolánico:** Es el cemento que resulta de la integración de Clinker portland, materiales puzolánicos y sulfato de calcio.

A continuación, se muestran estos tipos de cemento y su denominación.

*Tabla 3 Tipos de Cemento*

<b>Tipo</b>	<b>Denominación.</b>
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

La norma anterior también menciona la clasificación del cemento de acuerdo a su clase resistente.



*Tabla 4 Tipos de cemento de acuerdo a su clase resistente*

<b>Tipo</b>	<b>Denominación.</b>
20	Resistencia mínima a la compresión de 20 MPa a 28 días.
30	Resistencia mínima a la compresión de 30 MPa a 28 días.
30 R	Resistencia mínima a la compresión de 30 MPa a 28 días y además adquiere resistencia mínima de 20 MPa a 3 días.
40	Resistencia mínima a la compresión de 40 MPa a 28 días.
40 R	Resistencia mínima a la compresión de 40 MPa a 28 días y además adquiere resistencia mínima de 30 MPa a 3 días.

Además, existen cementantes con características especiales, tales como se muestran a continuación.

*Tabla 5 Características especiales de los cementos*

<b>Tipo</b>	<b>Denominación.</b>
RS	Resistente a los Sulfatos.
BRA	Bajo Reactividad Alkali agregado.
BCH	Bajo Calor de Hidratación.
B	Blanco.

En la misma normativa se establece los parámetros de calidad de cada tipo de cemento con características especiales, el cemento blanco deberá de tener una blancura mínima del 70%

Para el calor de hidratación a los 28 días el valor mínimo es 344 y el máximo de 377 u. mientras que la clase resistente a sulfatos se subclasifican en moderadamente resistentes, altamente resistentes y muy altamente resistentes.



## 2.2. Agregados pétreos.

Los agregados pétreos constituyen entre el 60% y 75% del volumen total de un concreto hidráulico, por lo que el estudio de sus propiedades físicas y químicas es esencial para la correcta elaboración de una mezcla, además estos influyen directamente en las propiedades mecánicas tanto en estado fresco como en estado endurecido.

### 2.2.1. Arena.

La arena para construcción es un tipo de agregado fino o árido que se utiliza para fabricar concreto y mortero; se compone de partículas de rocas trituradas que pueden ser muy pequeñas y finas o un poco más grandes dependiendo del uso para el que sea destinada.

La arena tiene dos orígenes:

- Origen natural: Se le extrae de canteras aluviales, ríos, lagos o depósitos volcánicos.
- Origen artificial: Mediante la trituración de rocas por medios mecánicos.

Ambos métodos de extracción de la arena dan como resultado un producto limpio, compacto, durable y resistente; dentro de los requisitos establecidos por las normas oficiales de construcción, no debe contener cantidades dañinas de arcilla, limo álcalis, mica, materiales orgánicos, entre otros componentes perjudiciales.



### 2.2.2. Grava

La grava usada en la construcción es un agregado grueso que va en tamaño desde las 3” hasta aquel material que se retiene en la malla N° 4 (4.76mm). La grava es uno de los materiales de construcción básicos para la industria de la edificación. La grava se forma a raíz de la fragmentación natural de las rocas que están en la corteza terrestre, aunque también se puede fabricar artificialmente a través de un proceso de triturado.

La roca se tritura y se obtiene el material que es esencial para la construcción, se utiliza como base para el concreto y pavimentación, aunque también es posible utilizarlo para algunos tipos de decoración o incluso para rellenar muros.

La grava tiene dos orígenes:

- Origen natural: Se le extrae de canteras aluviales, ríos, lagos o depósitos volcánicos.
- Origen artificial: Mediante la trituración de rocas por medios mecánicos, también conocida mayormente como grava triturada.

Al igual que el resto de los materiales de construcción, la calidad es básica para asegurar que cumpla con su objetivo de resistencia.

Para saber si una grava tiene una buena calidad se deberá estudiar su dureza, resistencia y limpieza, ésta no debe tener materiales extraños o polvo, de lo contrario la grava estaría comprometida y su uso no sería recomendable.



### 2.3. Agua para concreto.

Es un componente esencial para la elaboración de concretos y morteros que permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante, hidratar el cemento y dar manejabilidad al concreto.

De ahí surge la necesidad de conocer los parámetros ideales que deben cumplir las aguas naturales o contaminadas, diferentes de las potables para emplearse en la elaboración y curado de concreto hidráulico. La calidad del agua de mezclado es de suma importancia ya que las impurezas del agua pueden interferir en el fraguado del cemento, pueden afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie, y también pueden conducir a la corrosión del acero de refuerzo (Neville, 1999).

El agua debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el concreto o el refuerzo.

Si contiene sustancias que le produzcan color, olor o sabor inusuales, objetables o que causen sospecha, el agua no se debe usar a menos que existan registros de concretos elaborados con ésta, o información que indique que no perjudica la calidad del concreto.

El agua de mar o salina no debe de usarse en la elaboración del concreto.

De acuerdo a la (NMX-C-122-ONNCCE-2019, 2019) la clasificación del agua depende de la agresividad con la cual esta actúa en la elaboración y curado del concreto, descrita a continuación.

La agresividad de las aguas para la elaboración y curado del concreto, está en función de la ausencia de algunos compuestos en ellas o de la presencia de sustancias químicas perjudiciales disueltas o en suspensión en concentraciones que sobrepasan determinados límites.

A continuación, se describe la forma en que actúan.



- Aguas puras: Son agresivas por su acción disolvente e hidrolizante sobre los compuestos cálcicos del concreto.
- Aguas ácidas naturales: Su acción se debe a la presencia de gas carbónico libre ( $\text{CO}_2$ ) y/o ácidos húmicos que disuelven rápidamente los compuestos del cemento, de los agregados calizos y del concreto.
- Aguas fuertemente salinas: Cuando estas aguas contienen fuerte concentración de ciertas sales, éstas propician que otras muy agresivas se vuelvan más solubles antes de la saturación. Como aguas de mezclado, su acción sobre la cal es que interrumpe las reacciones de fraguado del cemento y cuando se emplean para curado puede ejercer acción disolvente sobre los componentes cálcicos del concreto.
- Aguas alcalinas: Estas producen la hidrolisis alcalina de ciertos compuestos del cemento por los cationes alcalinos y pueden ser nocivas para los cementos Portland mencionados en la (NXM-C-414-ONNCCE-2017 , 2017) los cuales sufren un ataque corrosivo con aguas de esta naturaleza ya que los cationes alcalinos tienen una acción sobre los aluminatos cálcicos hidratados y sobre los iones de calcio.
- Agua sulfatada (Selenitosas): Esta agua puede considerarse la más agresiva, en lo particular para los cementos ricos en cal total y aluminato tricálcico y en lo general para aquellos concretos o morteros fabricados con cementos de reacción básica tales como los Portland. En general esta agua propicia la formación de una sal doble fuertemente hidratada, conocida como Sal de Candlot, que es un sulfato aluminato tricálcico bajo una forma pulverulenta y expansiva.
- Agua magnesiana: El agua magnesiana que contiene sulfato de magnesio, es la más agresiva por la gran solubilidad de éste y su tendencia a fijar la cal formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble.



- Agua clorurada: Esta agua en general debe considerarse agresiva puesto que la solubilidad de la cal y el yeso en ella es mayor que en el agua pura, y en particular este efecto se incrementa en el agua fuertemente clorurada, que con la presencia de los cloruros alcalinos favorecen la solubilidad de varias sales agresivas. Por otra parte, en determinadas concentraciones puede ejercer una acción disolvente sobre los componentes del cemento y del concreto, y su agresividad es aún mayor en el caso del concreto armado.
- Agua de mar: La acción del agua de mar es muy compleja, se parece a la del agua selenitosa natural y aunque su contenido de sulfatos es superior al de ésta última, su proceso de ataque es lento y un poco menos agresivo, debido a la acumulación superficial de calcita, formada por la reacción de la cal del cemento con el bicarbonato de calcio que contiene el agua de mar.

Por otra parte, el sulfato de cálcico no está en el estado de saturación debido a la presencia de otros sulfatos, tales como el de magnesio. También contribuye a disminuir la agresividad, la acción inhibidora no despreciable, de los cloruros sobre el ataque de los sulfatos. Sin embargo, el empleo del agua de mar en los concretos simples produce eflorescencias. En el concreto reforzado y/o presforzado aumenta el peligro de la corrosión del acero por lo que no debe usarse para estos fines.

- Agua industrial: El agua residual de las instalaciones industriales, generalmente es perjudicial para el concreto ya que contienen iones sulfatos, ácidos orgánicos e inorgánicos que atacan a todos los tipos de cemento, de éstos los más resistentes son los que prácticamente no contienen cal o no tienen posibilidad de liberarla, tales como: los aluminosos, los puzolánicos y los de escoria de alto horno con bajo contenido de Clinker.
- Aguas negras: Dada la complejidad de la composición de las aguas negras no es recomendable el uso de ellas en el concreto, ya que sus efectos son



imprevisibles, sólo podrían ser utilizadas aquellas que previamente han sido tratadas adecuadamente.

Los valores máximos permisibles contenidos en el agua se expresan en la siguiente tabla.

*Tabla 6 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas*

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulforetistentes Límites en p.p.m.
<b>Sólidos en suspensión.</b>		
En agua naturales (limos y arcillas)	2,000	2,000
En agua recicladas (finos de cemento y agregados)	50,000	35,000
<b>Cloruros como Cl (a)</b>		
Para concretos con acero preesfuerzo y piezas de puentes	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambientes húmedos o en contacto con metales como Al o galvanizado.	700 (c)	1,000 (c)
Sulfato como SO <sub>4</sub> = (a)	3,000	3,500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> (a)	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	3
Álcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450
Total de impurezas en solución	3,500	4000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor de pH	No menores de 6	No menores de 6.5

Las aguas referidas anteriormente que se pretendan usar en la elaboración y curado del concreto hidráulico, excluyendo el agua de mar, deben de cumplir los requisitos de la tabla 6. El agua de mar, cuando sea imprescindible su empleo, esta debe usarse únicamente para la fabricación y curado del concreto sin aceros de refuerzo.



## 2.4. Aditivos para concreto

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, fuerte, durable, estanque y resistente al desgaste. Estas calidades se las puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados, preferiblemente al uso de aditivos (a excepción de los inclusores de aire cuando sean necesarios). (Kosmatka, 2004).

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducción del costo de la construcción de concreto.
- Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
- Mantenimiento de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.
- Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue:

- Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire): Estos tienen la capacidad de modificar el contenido unitario de aire en el concreto, medido en %
- Aditivos reductores de agua: Producto químico que tiene la propiedad de disminuir la cantidad de agua de la mezcla requerida para producir un concreto de una consistencia dada.



- **Plastificantes (fluidificantes):** Producto químico que tiene la capacidad de aumentar el revenimiento del concreto en 90 mm como mínimo con respecto al testigo, para producir un concreto que fluye con revenimientos mayores a 190 mm sin presentar segregación o sangrado.
- **Aditivos aceleradores (acelerantes):** Es un producto químico que tiene la propiedad de acortar el tiempo del alcance de la resistencia a la compresión del concreto.
- **Aditivos retardadores (retardantes):** Producto químico que tiene la capacidad de prolongar los tiempos de fraguado del concreto.
- **Aditivos de control de la hidratación:** Estos aditivos pueden suspender el fraguado por toda la noche, posibilitando la reutilización de concretos retornados al camión de concreto premezclado. Este aditivo también es útil en la manutención del concreto estabilizado, sin endurecer, durante el transporte por largos periodos
- **Inhibidores de corrosión:** Estos productos detienen químicamente la reacción de corrosión, usado donde las sales y cloruros están presentes como ambientes marinos y estacionamientos.
- **Reductores de retracción:** tienen su uso potencial en tableros de puentes, losas de pisos críticos y edificios donde se deban minimizar las fisuras (grietas) y la deformación por razones de durabilidad y estéticas, teniendo una efectividad del 25 al 50%.
- **Inhibidores de reacción álcali-agregado.** Inhibidores de la reacción Álcali agregado.
- **Aditivos colorantes:** Estos tienen el objetivo de cambiar el aspecto del concreto implementando colorantes naturales o sintéticos por estética o seguridad.
- **Aditivos diversos,** tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.



De acuerdo a la (NMX-C-255-ONNCCE-2013, 2013) los aditivos se clasifican de la siguiente manera:

*Tabla 7 Clasificación de los tipos de aditivos.*

Tipo A	Reductor de agua
Tipo B	Retardante
Tipo C	Acelerante del fraguado inicial
Tipo C2	Acelerante de resistencia
Tipo D	Reductor de agua y retardante
Tipo E	Reductor de agua y acelerante
Tipo F	Reductor de agua de alto rango
Tipo G	Reductor de agua de alto rango y retardante
Tipo F2	Superplastificante
Tipo G2	Superplastificante y retardante
Tipo AA	Modificador del contenido de aire

## 2.5. Plástico

### 2.5.1. Antecedentes del plástico.

Los plásticos son materiales sintéticos constituidos por polímeros, grandes moléculas consistentes en una cadena larguísima de unidades repetidas, y a los que, de ahí el nombre, se les puede dar forma al calentarlos. Cada plástico tiene una determinada temperatura a la que deja de ser duro y frágil para volverse blando, maleable. Hay que distinguir entre los termoplásticos y los materiales termo rígidos. Los primeros siguen siendo maleables hasta que se derriten y conservan la forma que se les haya dado; si se los recalienta, puede dárseles de nuevo otra forma con fuerzas de tracción. Eso sucede por la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidas sus cadenas poliméricas en un sólido, con calor suficiente pueden deslizar unas sobre otras.



La forma de los materiales termo rígidos, en cambio, se vuelve inalterable a partir de cierta temperatura, normalmente alta; la razón es la creación de enlaces cruzados, puentes de átomos que unen entre sí las cadenas poliméricas e impiden que el material se ablande de nuevo al recalentarlo. Los materiales con enlaces cruzados no se funden ni se disuelven, aunque pueden absorber disolvente; cuando han absorbido mucho se vuelven geles.

El primer plástico fue la parkesina, inventada por el químico inglés Alexander Parkes en 1862. En esencia era nitrocelulosa ablandada con aceites vegetales y alcanfor.

La industria de los plásticos empezó en 1863, cuando la firma fabricante de bolas de billar Phelan & Collander ofreció diez mil dólares a quien pudiera desarrollar un sustituto del marfil que se usaba para fabricar las bolas. Quizá la compañía haya querido proteger a los elefantes, pero es más probable que buscara un material semejante al marfil, el cual era cada vez más escaso y caro. (Sosa, 2020)

El estadounidense John W. Hyatt descubrió el papel fundamental del alcanfor en la plastificación y llamó a la sustancia celuloide. El primer plástico completamente sintético fue la baquelita, creada a partir del fenol y el formaldehído por el químico belga, nacionalizado estadounidense, Hendrik Baekeland en 1910. La película de acetato se usó para envolver desde la Primera Guerra Mundial, y en 1935 empezó a usarse el triacetato para la fotografía. El PVC se produjo a partir de 1912 (fecha de la patente de los alemanes Klatté y Zacharias) mediante la polimerización del cloruro de vinilo, descubierto por Regnault en 1835. Un avance fundamental fue el descubrimiento de las macromoléculas por el químico alemán Hermann Staudinger, quien, en 1922, anunció que la goma estaba hecha de largas cadenas de unidades de isopropeno. Su hipótesis encontró muchas críticas, pero enseguida demostraría la existencia de los grandes polímeros de poliestireno. El metacrilato se produjo desde 1928, y por esa época empieza, sobre todo en Alemania, la producción masiva del poliestireno. La I.G. Farben fabricó poliuretano desde 1938. En Estados Unidos, el papel más destacado lo tuvo la compañía química Du Pont de Nemours, cuyas investigaciones condujeron a la producción industrial del nailon en 1938. El polietileno, inventado en Inglaterra, empezó a producirse comercialmente en 1939, las resinas epoxi en 1943, los policarbonatos en 1956, el kevlar en los años setenta.

En 1953, el químico alemán Karl Ziegler desarrolló el polietileno, y en 1954, el italiano Giulio Natta desarrolló el polipropileno, que son los dos plásticos más



utilizados en la actualidad. En 1963, estos dos científicos compartieron el Premio Nobel de Química por sus estudios acerca de los polímeros. (Gobierno de Canarias, 2020)

### 2.5.2. Tipos de plásticos.

La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes llamadas polímeros.

La unidad de bajo peso molecular es el monómero: Molécula, generalmente de la química orgánica, capaz de combinarse con moléculas de su misma naturaleza para formar un producto de peso molecular muy elevado, denominado polímero.

Los polímeros (del griego *poly*, muchos; *meros*, parte, segmento), se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas (monómeros) que forman enormes cadenas de diferentes formas. Pueden pertenecer a la química inorgánica (cemento, porcelana, vidrio, etc.) o a la química orgánica (proteínas, grasas, propilenos, etc.)

Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización es indicado por un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetrámero, pentámero y sucesivos. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades. De este modo, el trióximetileno, es el trímero del formaldehído, por ejemplo. (Dietz, 1973)

Los plásticos se pueden clasificar por su origen, dividiéndose en:

- Naturales: cuando se encuentran en la naturaleza (celulosa, caucho, resinas vegetales, etc.).



- Artificiales o semisintéticos. Obtenidos por transformación química de polímeros naturales.

A su vez, los plásticos se pueden clasificar por su forma y estructura, siendo estas las macromoléculas, lineales o ramificadas, pueden estar colocadas, unas con respecto a otras, de forma diferente. Puede darse el caso de que se encuentren desordenadas, entrelazadas como un fieltro. Es lo que se llama el estado amorfo. Los plásticos amorfos son vítreos, transparentes y generalmente frágiles.

Pueden estar alineadas, en claro paralelismo, como las cerillas en su caja. Pero no se sitúan así en toda su longitud, sino en tramos muy pequeños, que reciben el nombre de cristalitas (cuerpo sólido cuyos elementos constitutivos - átomos, iones o moléculas- están dispuestos de forma regular en las tres dimensiones). Las longitudes restantes de cada macromolécula se pliegan formando lazos o bucles. Los plásticos parcialmente cristalinos son translúcidos u opacos, pero más resistentes al calor que los amorfos.

- Los plásticos con macromoléculas lineales o ramificadas, pero no entrelazadas (reticuladas) pueden ser moldeados de manera reversible. Por acción del calor, se reblandecen para adoptar la forma que se les quiera dar. Son los termoplásticos.
- Los plásticos con macromoléculas tridimensionalmente reticuladas (entrelazadas) no pueden ser moldeados de manera reversible. Son los termoendurecidos. Para forzar la reticulación, los químicos introducen, en las macromoléculas originales, grupos reactivos de moléculas que se disponen a distancias regulares y que actúan como grapas entre las cadenas.
- Cuando las macromoléculas forman una red de malla abierta, los plásticos resultantes son elásticos como la goma. Se les llama elastómeros.

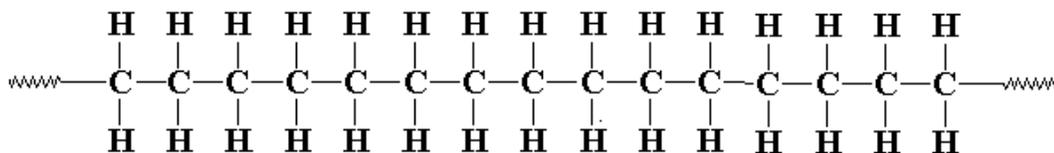


Con el fin de favorecer el conocimiento de los distintos materiales plásticos, especialmente en el momento de su clasificación, la Sociedad de Industrias Plásticas de los Estados Unidos (SPI) ha difundido un código de identificación de uso corriente a nivel internacional, que es el utilizado en este tema. (Confederación española de fabricantes de plástico, 1991)

Existen más de 100 tipos de plásticos, los más comunes son sólo 6 y se los identifica con un número dentro de un triángulo (símbolo de reciclaje) para efecto de facilitar su clasificación para el reciclado, de los cuales hablaremos a continuación.

### 2.5.3. Composición química de los plásticos más comunes.

El polietileno es un termoplástico fabricado a partir del etileno (elaborado a partir del etano, uno de los componentes del gas natural) , en forma de gránulos o de polvo blanco. Sus propiedades técnicas dependen de la masa molecular, la ramificación de la cadena y el grado de cristalinidad, por lo que el método de elaboración influye considerablemente, especialmente la presión. Todos los polímeros derivados del etileno tienen una gran resistencia a los productos químicos, ácidos, bases, aceites, grasas, disolventes ... Sin embargo, su resistencia es moderada para los hidrocarburos normales y clorados . Debido a su gran facilidad de extrusión para film, los poliestirenos son muy utilizados para recubrimientos de otros materiales , papel, cartón, aluminio y para embalajes.



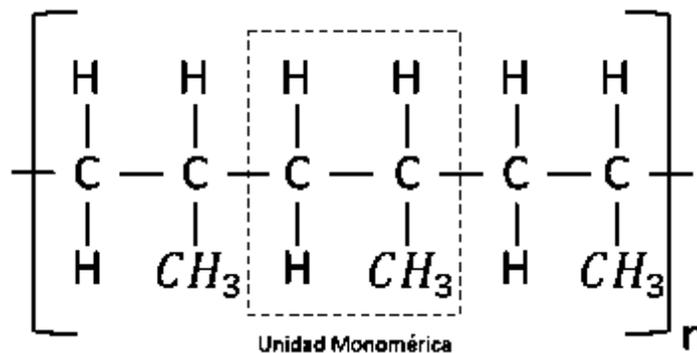
*Ilustración 2 Fórmula química del polietileno de alta densidad*



Polipropileno, es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando etileno durante el proceso.

Soporta bien temperaturas cercanas a los 100 °C por lo que se utiliza para tuberías de fluidos calientes, piezas de automóviles (parachoques) y electrodomésticos, cajas de baterías, jeringas desechables, tapas en general, envases, baldes, todo tipo de cartelería interior y exterior. Al tener una estructura lineal se utiliza para rafias y monofilamentos, fabricación de moquetas, cuerdas, sacos tejidos, cintas para embalaje, pañales desechables.

Un plástico rígido de alta cristalinidad y elevado punto de fusión, excelente resistencia química y baja densidad (la más baja de todos los plásticos). Al adicionarle cargas (talco, caucho, fibra de vidrio), se refuerzan sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería. Muy sensible al frío y a la luz ultravioleta (envejece rápidamente), por lo que necesita estabilizantes a la luz. Barato, resistente a la temperatura, y no tóxico.



*Ilustración 3 Fórmula química del polipropileno*

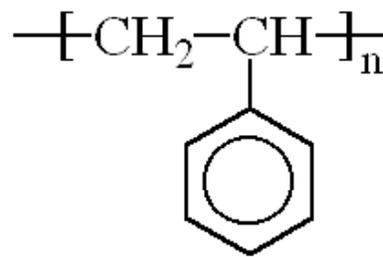
El poliestireno estructuralmente, es una larga cadena hidrocarbonada, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono. Las materias primas para la fabricación del estireno son el etileno y el benceno.

Hay tres clases de poliestireno:



- PS Cristal: Es un polímero de estireno monómero (derivado del petróleo), cristalino y de alto brillo.
- PS Alto Impacto: Es un polímero de estireno monómero con occlusiones de Polibutadieno que le confiere alta resistencia al impacto.
- PS expandido que es una espuma. Es Termoplástico y fácilmente moldeable a través de procesos de: Inyección, Extrusión/Termoformado, Soplado.

Se usa en envases, vasos, platos y cubiertos desechable, neveras portátiles, máquinas de afeitar desechables, juguetes, casetes, aislantes térmicos y acústicos. Algunas de sus características son: Ignífugo, no tóxico, transparente, irrompible, fácil limpieza, fácil de serigrafiar, fácil de manipular, se puede cortar, taladrar, perforar y troquelar.



*Ilustración 4 Fórmula química del poliestireno*

PVC. Cloruro de polivinilo.

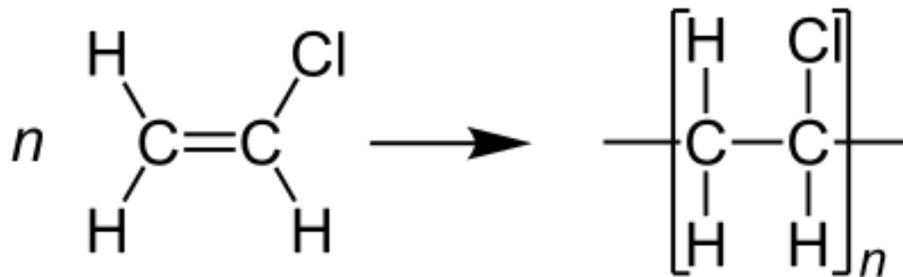
Este se produce a partir de dos materias primas naturales: gas 43% y sal común (\*) 57%.

Estructuralmente, el PVC es similar al polietileno, con la diferencia que cada dos átomos de carbono, uno de los átomos de hidrógeno está sustituido por un átomo de cloro. A este polímero termoplástico es necesario añadirle aditivos, plastificantes, elastificantes, cargas y otros polímeros para que adquiriera las propiedades que permitan su utilización en las diversas aplicaciones . Así, puede ser flexible o rígido; transparente, translúcido o completamente opaco; frágil o tenaz; compacto o espumado . El PVC rígido no lleva aditivos plastificantes mientras que el flexible o plastificado, sí los lleva.



Sus usos más comunes son: Envases, perfiles para marcos de ventanas, puertas, tuberías de desagües, mangueras, aislamiento de cables, juguetes, envolturas para golosinas, películas flexibles para envasado, papel vinílico (decoración), objetos termo conformados industriales y domésticos, tableros para mesas de trabajo y estanterías para laboratorios y aparatos electrodomésticos.

Sus principales características son su capacidad para admitir todo tipo de aditivos permite que pueda adquirir propiedades muy distintas y teniendo en cuenta su precio relativamente bajo le hace ser un material muy apreciado y utilizado para fabricar multitud de productos, es ignífugo (con altas temperaturas los átomos de cloro son liberados, inhibiendo la combustión), resistente a la intemperie, no tóxico, impermeable y no quebradizo, tiene buenas propiedades de aislamiento, es fácil de manipular, se puede cortar, taladrar, clavar, enroscar, perforar, pegar. Además, es resistente a los agentes químicos y corrosivos.



*Ilustración 5 Fórmula química del cloruro de vinilo en proceso de polimerización formando el Cloruro de polivinilo.*

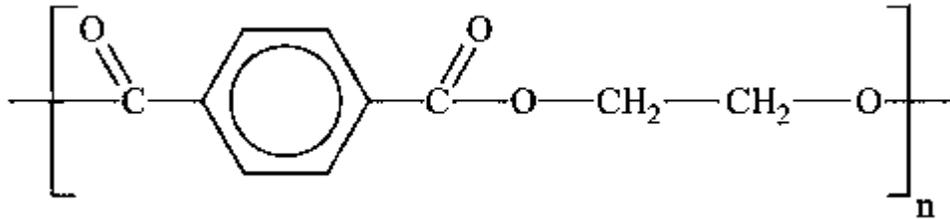
### Polietileno Tereftalato. (PET)

Se produce a partir del ácido Tereftálico y Etilenglicol, por policondensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella.

Sus usos más comunes son: Envases de gaseosas, aceites, agua mineral, salsas. (Para el grado botella se lo debe post condensar, existiendo diversos colores para estos usos), fibras textiles, cintas de vídeo y audio, películas radiográficas, geotextiles (telas para pavimentación).



Algunas de sus características son: Barrera a los gases, transparente, irrompible, liviano, no tóxico.



*Ilustración 6 Fórmula química del Polietileno Tereftalato, PET.*

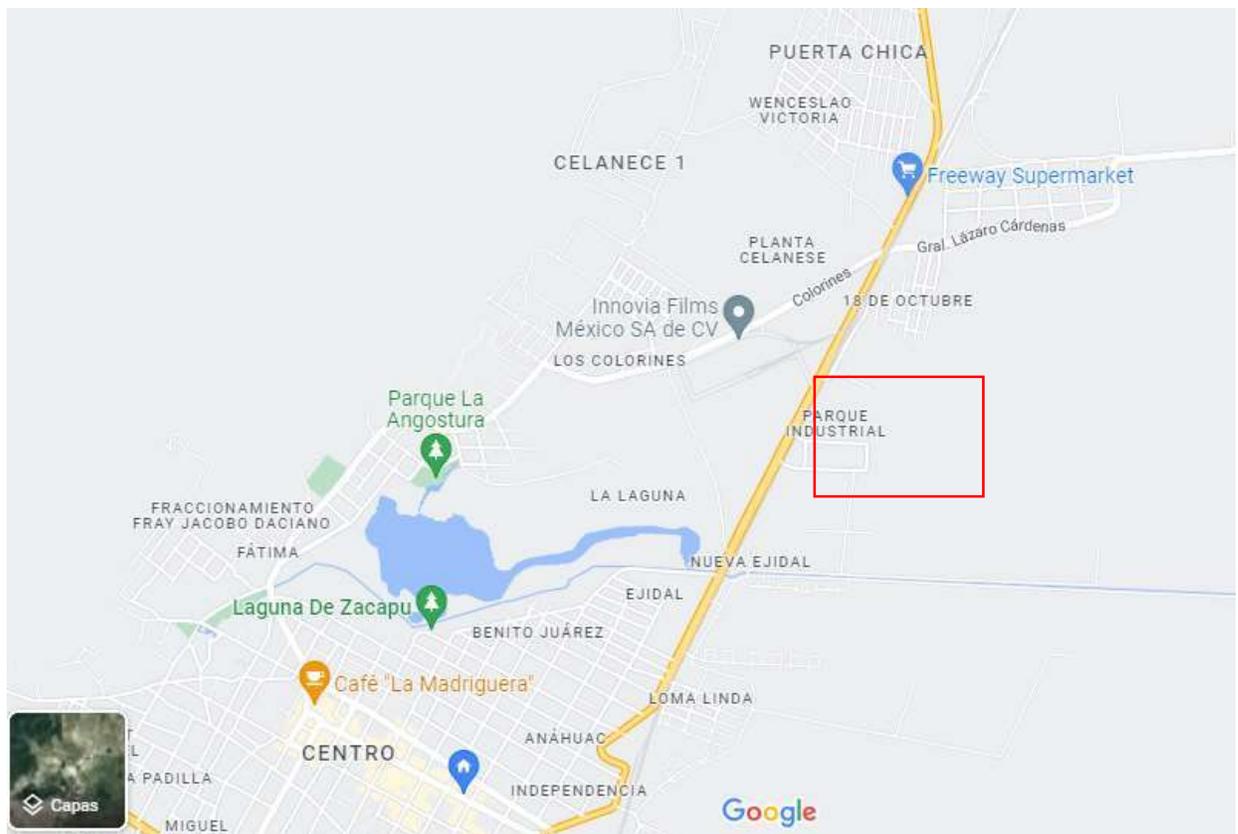
Estos son los principales tipos plásticos que en combinación se emplearon en este proyecto de investigación.



### 3. Metodología.

#### 3.1. Origen y obtención del agregado plástico triturado.

Para la obtención del agregado plástico triturado se visitó el “Parque industrial” ubicado en Zacapu, Michoacán. En dicho lugar se localiza una industria dedicada al reciclaje de plástico y a la elaboración de materia prima a partir del desecho.



*Ilustración 7 Ubicación del Parque Industrial Zacapu. Google maps*

Al llegar al lugar se evidenció una falta en el tratamiento de este material desechado, ya que se encontraba tirado en el suelo sin la existencia de un protocolo de sanidad o medida ambiental con el fin de que este no afecte al medio con el que interactúa.



*Ilustración 9 Material Plástico Triturado Desechado*



*Ilustración 8 Recolección del material.*

Una vez obtenido el material y al tratarse de diferentes tipos de plásticos combinados y triturados, se llevaron al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, donde se retiraron aquellas partículas donde su densidad fue menor que 1, esto con el fin de evitar que al momento de añadirlas al concreto estas asciendan a la parte superior de los especímenes por la diferencia de densidades en comparación con los agregados pétreos. Esto se hizo vertiendo agua en un recipiente y a continuación se añadió el plástico, el cual, aquel que flotaba era retirado por medio de coladores o mallas, y el que se sedimentaba era pasado a una charola y puesto al sol para su secado durante un par de horas.

Una vez hecho este procedimiento se hicieron tres pruebas de densidad para rectificar que esta sea mayor a 1, esto de acuerdo a la norma vigente (NMX-C-165-ONNCCE-2020, 2020) obteniendo los siguientes resultados.

*Tabla 8 Densidad promedio del material plástico*

<b>Densidad del material plástico.</b>					
Probeta	Masa inicial	Masa probeta con agua	Masa probeta con agua + material	Densidad	Densidad promedio
Probeta 1	200 g	772.8	798.6	1.1481	1.15106
Probeta 2	200 g	771.4	795.9	1.1396	
Probeta 3	200 g	746.6	775.0	1.1655	



Posteriormente se hizo un tamizado del material para conocer el tamaño promedio de las partículas, esta prueba granulométrica arrojó que el 100% del material paso la malla No. 4 (4.76mm) pasando por las mallas No. 6 y No. 8 y se retenía en la malla No. 10 (2.0 mm) por lo que por normativa corresponde al tamaño nominal aceptado para la sustitución de arena.

Terminado lo anterior, el material se colocó en un recipiente listo para usarse como sustitución de agregado fino en las mezclas de concreto a probar.



*Ilustración 10 Material plástico usado en las pruebas.*



### 3.2. Caracterización de los agregados pétreos utilizados.

Para la caracterización de los agregados utilizados se siguió la normativa vigente (Normas mexicanas, NMX) realizándose los procedimientos en el laboratorio de materiales Ing. Luis Silva Ruelas, perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Se hicieron pruebas de densidad, masa volumétrica seca suelta, masa volumétrica seca varillada, módulo de finura, absorción y granulometría, esto en agregado fino, específicamente arena negra volcánica.

Así como también densidad, masa volumétrica seca suelta, masa volumétrica seca varillada, absorción, densidad y granulometría para el agregado grueso tratándose de grava triturada.

Para el material plástico se hizo granulometría y densidad.

Por último, para el cemento se realizaron pruebas de consistencia normal y tiempos de fraguado, el tipo de cementante corresponde a un cemento Tolteca CPC-30R-RS.

### 3.3. Características de los moldes y pruebas en concreto fresco.

Para la elaboración de especímenes de concreto se siguieron las Normas mexicanas vigentes.

Se utilizaron moldes de 10 cm. de diámetro por 20 cm. de altura para elementos cilíndricos.

Para elementos prismáticos se utilizaron moldes de 15 cm de base por 15 cm de altura por 60 cm. de largo.

El diseño de las mezclas se basó en el método ACI (American Concrete Institute) donde se propuso una resistencia a la compresión axial de  $250 \text{ kg/cm}^2$  (25 MPa) y un revenimiento de 15 cm.



Para la prueba de revenimiento se utilizó un cono Abrams, con abertura superior de 10 cm, una abertura inferior de 20 cm y 30 cm de altura, con dos agarraderas laterales y base para fijar a la placa, se utilizó una varilla punta de bala de 600 mm y diámetro 11 mm (5/8”) y un cucharón de 1 litro de capacidad.

Se realizó la prueba de masa volumétrica en concreto fresco.

Se elaboraron 3 mezclas diferentes, una mezcla testigo y dos con sustitución de arena por material plástico del 5% y 10% respectivamente, dando como resultado una mezcla de agua, grava, arena, cemento y plástico triturado.

### 3.4. Pruebas en concreto en estado endurecido.

Las edades de prueba corresponden a 7, 14, 28, 45 y 60 días para elementos cilíndricos y 28, 45 y 60 días para elementos tipo “viga”.

En cilindros, las pruebas realizadas son de compresión, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y tensión indirecta se realizaron a las edades de 7, 14, 28, 45 y 60 días. Para los ensayos de módulos de elasticidad se hicieron pruebas a 7, 28 y 60 días.

Así también para vigas, las pruebas de flexión, frecuencia de resonancia magnética, resistividad eléctrica y velocidad de pulso se hicieron a las edades de 28, 45 y 60 días.

La elaboración de especímenes, el muestreo en concreto fresco y curado, pruebas destructivas y no destructivas, cálculos y resultados se hicieron de acuerdo a las normativas vigentes (NMX)

Las dos mezclas con sustitución de arena por material plástico se compararon con las muestras testigo a las edades especificadas.



## 4. Desarrollo experimental

Las pruebas aquí descritas se realizaron de acuerdo a las Normativas Mexicanas vigentes (NMX).

Este proyecto se llevó a cabo en el laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería civil, “Ing. Luis Silva Ruelas”, ayudado parcialmente del manual (Análisis de materiales, 2011), elaborado en el mismo laboratorio y apoyado por catedráticos de la institución, así como de las normas vigentes.

### 4.1. Pruebas en agregado fino

#### 4.1.1. Cuarteo en arena

El cuarteo se realiza con el objetivo de obtener de una muestra, porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran.

Existen dos métodos para el procedimiento de esta prueba, el cuarteo manual con pala y el cuarteo por medio del cuarteador mecánico, para esta investigación se usó el cuarteador mecánico.

Este proceso se realizó bajo la normativa (NMX-C-170-ONNCCE-2019, 2019)

Equipo.

- Cuarteador mecánico con tolva receptora.
- Cucharon metálico.



### Procedimiento.

Se coloca la muestra de campo en la tolva o en el cucharón alimentador, distribuyéndola uniformemente en toda su longitud para que, al verter sobre los conductos, fluyan por cada uno de ellos cantidades aproximadamente iguales de material. La velocidad a la que se alimenta la muestra debe ser tal que permita un flujo continuo por los conductos hacia los receptáculos inferiores.



Se vuelve a introducir la porción de muestra de uno de los receptáculos al cuarteador cuantas veces sea necesario, hasta reducir la muestra al tamaño requerido para la prueba programada.

Se eligió este método por ser más efectivo debido a la poca pérdida de material fino.

*Ilustración 11 Cuarteo del agregado fino*

#### 4.1.2. Humedad actual en arenas

Esta prueba tiene como objetivo determinar la cantidad de agua que contiene el agregado en estado natural antes de ser utilizado. los resultados se emplean en la determinación de las cantidades netas de los materiales que intervienen en una revoltura de concreto, así como para realizar las correcciones por humedad en caso de ser requeridas.

Este proceso se realizó de acuerdo a (NMX-C-166-ONNCCE-2018, 2018)



### Equipo.

- Muestra representativa.
- Charola metálica o recipiente.
- Espátula o agitador.
- Parrilla eléctrica o fuente de calor.
- Vidrio.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.

### Procedimiento.

Se toma una muestra del material preparado de aprox. 300 gr. y se determina su masa con una aproximación del 0,1 % de gramo, evitando la pérdida de agua hasta donde sea posible. A esto lo llamamos “Mh”

Se seca totalmente la muestra en el recipiente, por medio de la fuente de calor seleccionada, teniendo la precaución de evitar pérdidas de partículas durante el secado, se debe mover continuamente la muestra durante el secado con la espátula para acelerar la operación y evitar sobrecalentamiento. Se considera que la muestra está totalmente seca, cuando al colocar sobre ella un cristal a la temperatura ambiente, éste no se empaña.

Se dejará enfriar la muestra hasta la temperatura ambiente y se determinará su masa, con la aproximación al décimo de gramo y se registra con la abreviatura “Ms”.



*Ilustración 12 Muestra de arena en estado natural*



*Ilustración 13 Secado de la muestra de arena*



Cálculos.

$$\% H. Actual = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

donde:

% H. actual = Porcentaje de humedad actual.

Mh = Masa húmeda de la arena en gramos.

Ms = Masa seca en gramos.

Referencia:

La (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) establece los términos de diseño por desempeño en durabilidad que deben de cumplir los elementos de una estructura de concreto para alcanzar la vida de servicio establecida.

Para la absorción de humedad en los agregados esta no debe de ser mayor al 5%

#### 4.1.3. Humedad superficial y humedad de absorción en arenas.

El objetivo de este ensayo es determinar la capacidad máxima de absorción que tiene la arena expresada en porcentaje. (NMX-C-165-ONNCCE-2020, 2020)

Equipo:

- Muestra representativa (2 kg. Aproximadamente)
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Parrilla eléctrica.
- Charolas metálicas.
- Cono metálico (Troncocónico)
- Un pisón metálico.
- Espátula.



#### Procedimiento:

La muestra de 2 kg se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra se obtiene mediante alguno de los métodos de reducción de muestras.

Al término de este tiempo se seca superficialmente, la arena por medio del molde troncocónico como se describe a continuación:

Se coloca la arena en la charola y se coloca en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tiene en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.

Para saber cuándo la arena está seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.

Cuando la arena está seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando este peso como peso saturado y superficialmente seco (Ph)

La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso constante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.

Para saber cuándo el material está seco se coloca el cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrar el peso como peso seco del material (Ps), si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente.



Ilustración 15 Tronco cónico en arena



Ilustración 14 Arena superficialmente seca

Cálculos.

$$\% H. de absorción = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

donde:

% H. de absorción. = Porcentaje de humedad de absorción.

Mh = Masa húmeda de la arena en gramos.

Ms = Masa seca en gramos.

Referencia:

La (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) establece los términos de diseño por desempeño en durabilidad que deben de cumplir los elementos de una estructura de concreto para alcanzar la vida de servicio establecida.

Para la absorción de humedad en los agregados esta no debe de ser mayor al 5%



#### 4.1.4. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)

Tiene como objetivo determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

Equipo:

- Muestra de arena completamente seca.
- Recipiente con una masa y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Báscula
- Cucharón de 1 lt.
- Una pala.

Procedimiento:

Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, distribuyendo uniformemente el material y llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesarlo. La masa obtenida anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.



*Ilustración 17 Arena enrasada en molde metálico.*



*Ilustración 16 Masa del material*



Cálculos.

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

donde:

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

M = Masa de la arena en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>

#### 4.1.5. Masa Volumétrica seca y varillada. (MVSV)

El objetivo es determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando el material tiene una determinada compactación. (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004)

Equipo:

- Muestra de arena completamente seca.
- Recipiente con una masa y volumen conocido.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Báscula
- Cucharón de 1 lt.
- Una pala.



#### Procedimiento:

Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe de hacerse en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolos en toda la superficie del material.

Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes. Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.

Después de haber realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se le resta el peso del recipiente para así obtener la masa neta del material.



*Ilustración 18 Material compactado y enrasado en el molde*

Cálculos.

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

donde:

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

M = Masa de la arena en gramos.

V = Volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>



#### 4.1.6. Granulometría en arenas y módulo de finura.

El objetivo de esta prueba es pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura de la muestra, tomando como referencia la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018).

##### Equipo:

- Juego de mallas #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200 con su tapa.
- Báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Cepillas de cerdas de alambre.
- Hojas de papel y marcadores.

##### Procedimiento.

Se sigue el procedimiento de la (NMX-C-077-ONNCCE-2019, 2019). Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura no mayor de 110°C.

Cuando el material este seco y frío, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo y se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.

Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap).

Después se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con aproximación al décimo de gramo, anotando los pesos en el registro correspondiente. Para lo cual se invertirán las mallas con todo cuidado y utilizando cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16 y 30 para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de la malla, mientras que las mallas 50 y 100 se limpiarán con cepillo de cerdas.



En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ellas se coloca el material retenido en cada una de las mallas previamente pesado, esto para tenerlo como testigo si es que surge algún error.

El cálculo y registro de este procedimiento se captura de la siguiente manera en este formato:

*Tabla 9 Llenado de datos en el análisis granulométrico del agregado fino.*

Malla	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
4	(A2)	$(A3) = \frac{A2}{Mm} * 100$	(A4) = A3	(A5) = 100 - A4
8	(B2)	$(B3) = \frac{B2}{Mm} * 100$	(B4) = A4 + B3	(B5) = 100 - B4
16	(C2)	$(C3) = \frac{C2}{Mm} * 100$	(C4) = B4 + C3	(C5) = 100 - C4
30	(D2)	$(D3) = \frac{D2}{Mm} * 100$	(D4) = C4 + D3	(D5) = 100 - D4
50	(E2)	$(E3) = \frac{E2}{Mm} * 100$	(E4) = D4 + E3	(E5) = 100 - E4
100	(F2)	$(F3) = \frac{F2}{Mm} * 100$	(F4) = E4 + F3	(F5) = 100 - F4
200	(G2)	$(G3) = \frac{G2}{Mm} * 100$	(G4) = F4 + G3	(G5) = 100 - G4
fondo	(H2)	$(H3) = \frac{H2}{Mm} * 100$	(H4) = G4 + H3	(H5) = 100 - H4
<b>Suma</b>	<b>Masa de la muestra (Mm) <math>\Sigma</math> (A2+B2+...+I2)</b>	<b><math>\Sigma</math> (A3+B3+...+I3)=100 %</b>	<b><math>\Sigma</math> (A4+B4+...+I4)=100 %</b>	<b><math>\Sigma</math> (A5+B5+...+I5)=100 %</b>

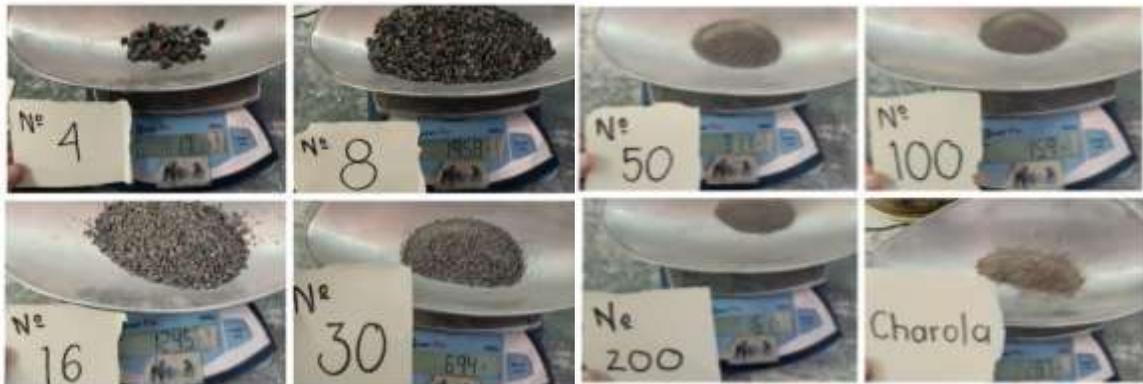


Para esta prueba se dejó la muestra cribar por medios mecánicos durante 15 minutos.

Posteriormente se hizo un cribado manual para una mayor reducción de la muestra.

*Ilustración 19 Agitado de mallas por medio mecánico por 10 min. mínimo.*

En la ilustración 20 se observan los pesos retenidos de una muestra de arena.



*Ilustración 20 Masa retenida por cada una de las mallas anteriormente mencionadas*



Cálculos.

$$MF = \frac{\Sigma \text{ de malla \#8 hasta \#100}}{100}$$

Donde:

MF = Módulo de finura

Especificaciones:

Para fines de calidad el módulo de finura se encuentre en el rango de 2.5 y 3.0 de acuerdo a la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) aunque puede quedar entre 2.3 y 3.1 según las especificaciones de granulometría de Bureau of reclamation ASTM-C33 y no mayor a 3.0 de acuerdo a (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018)

Al mismo tiempo señala los límites máximos del agregado fino, el cual está descrito en la tabla siguiente:

*Tabla 10 Límites granulométricos del agregado fino.*

<b>Malla</b>	<b>Material acumulado en masa, en porcentaje, % que pasa.</b>
9.5 mm (3/8")	100
4.75 mm (N° 4)	95 - 100
2.36 mm (N° 8)	80 - 100
1.18 mm (N° 16)	50 - 85
0.6 mm (N° 30)	25 - 60
0.3 mm (N° 50)	10 - 30
0.15 mm (N° 100)	2 - 10



#### 4.1.7. Densidad relativa de la arena.

El objetivo de esta prueba es determinar el volumen efectivo de las partículas de arena excluyendo los vacíos que se forman entre las mismas cuando se acomodan una sobre la otra, el tamaño de las partículas no debe de pasar de 4.76 mm. Los resultados se expresan con una aproximación al centésimo siguiendo la (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014)

#### Equipo.

- Muestra representativa. (1 kg aproximadamente)
- Charola metálica o recipiente.
- Espátula o agitador.
- Parrilla eléctrica o fuente de calor.
- Vidrio.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.
- Molde tronco cónico.
- Pisón.
- Probeta.
- Frasco.

#### Procedimiento:

Utilizando la probeta.

Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.

En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial ( $V_i$ ) en  $\text{cm}^3$  y enseguida se pesa una muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena ( $M_a$ ) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.



Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurando que no salpique agua porque esto no ocasionaría un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen de agua y vamos a registrar este valor como volumen final (Vf)



*Ilustración 22 Muestra superficialmente seca*



*Ilustración 21 Probeta con volumen y masa conocida y el agregado fino*

Cálculos.

$$DA = \frac{Ma}{Vf - Vi}$$

Dónde:

DA = Densidad de la arena en gr/cm<sup>3</sup>.

Ma = Masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

Vf-Vi = Volumen colocado dentro de la probeta en cm<sup>3</sup>.

Especificaciones:

La (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) establece los términos de diseño por desempeño en durabilidad que deben de cumplir los elementos de una estructura de concreto para alcanzar la vida de servicio establecida. Para la densidad de los agregados esta no debe ser mayor o igual que 2.4 adimensional.



## 4.2. Pruebas en agregado grueso.

### 4.2.1. Cuarteo en grava.

El cuarteo tiene como objetivo obtener de una muestra, porciones representativas de tamaño adecuado para efectuar las pruebas de laboratorio que se requieran.

Existen dos métodos para el procedimiento de esta prueba, el cuarteo manual con pala y el cuarteo por medio del cuarteador mecánico, para esta investigación se usó el cuarteador mecánico. Siguiendo el método descrito en la (NMX-C-170-ONNCCE-2019, 2019).

#### Equipo.

- Cuarteador mecánico con tolva receptora.
- Cucharón metálico.
- Pala.

#### Procedimiento.



*Ilustración 23 A un lado se aprecia la muestra representativa de grava, al centro se observa el cuarteador mecánico.*

Se coloca la muestra de campo en la tolva o en el cucharón alimentador, distribuyéndola uniformemente en toda su longitud para que, al verter sobre los conductos, fluyan por cada uno de ellos cantidades aproximadamente iguales de material.

La velocidad a la que se alimenta la muestra debe ser tal que permita un flujo continuo por los conductos hacia los receptáculos inferiores.

Se vuelve a introducir la porción de muestra de uno de los receptáculos al cuarteador cuantas veces sea necesario, hasta reducir la muestra al tamaño requerido para la prueba programada.



#### 4.2.2. Humedad actual en gravas.

Tiene como objetivo determinar la cantidad de agua que contiene el agregado en estado natural antes de ser utilizado. Los resultados se emplean en la determinación de las cantidades netas de los materiales que intervienen en una revoltura de concreto, así como para realizar las correcciones por humedad en caso de ser requeridas, esto de acuerdo a la (NMX-C-166-ONNCCE-2018, 2018)

##### Equipo.

- Muestra representativa.
- Charola metálica o recipiente.
- Espátula o agitador.
- Parrilla eléctrica o fuente de calor.
- Vidrio.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.

##### Procedimiento:

Se toma una muestra representativa de 400 a 500 g y se determina su masa, registrándola como masa húmeda (Mh)

Enseguida se coloca en la charola para exponerlo en la fuente de calor para eliminar el agua que contiene la grava moviéndola constantemente con la espátula para que el secado sea uniforme. Cuando aparentemente este seca colocamos el cristal sobre ella para hacer la verificación del secado, si se empaña el cristal o se le forman gotas de agua quiere decir que el material todavía está húmedo y por lo tanto debemos seguir moviéndolo hasta que se seque completamente, para darnos cuenta de esto repetimos la operación con el vidrio.

Cuando este seca la grava la retiramos de la fuente de calor y la dejamos enfriar un poco, posteriormente la pesamos para determinar la masa seca (Ms) en gramos.



*Ilustración 24 Colocación del vidrio para verificar que la muestra de grava está completamente seca*

Cálculos:

$$\% H. actual = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde:

% H. actual = Porcentaje de humedad actual.

Mh = Masa húmeda.

Ms = Masa seca.

#### 4.2.3. Humedad de absorción en gravas.

Determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco, de acuerdo a la (NMX-C-165-ONNCCE-2020, 2020).

Equipo:

- Muestra de grava aproximadamente 1 kg.
- Franela
- Charola metálicas
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Mallas #3/4” y #3/8”
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.



### Procedimiento.

De la muestra que se trae de campo se criba a través de las mallas 3/4" y 3/8" y del material que pasa la 3/4 y se retiene en 3/8 se pone a saturar en una charola un muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.

Enseguida con una franela se seca superficialmente una muestra de grava de aproximadamente 300 gramos anotando este valor como (Mh) masa saturada y superficialmente seca.

Se procede a colocar este material en una charola para secarlo en la parrilla eléctrica, para saber cuándo se eliminado completamente la humedad se coloca el vidrio sobre el material y si no empaña o se forman gotas de agua se retira, se deja enfriar un poco y se procede a pesarlo registrándolo como masa seca (Ms).



*Ilustración 26 Muestra de grava que pasó la malla 3/4" y se retuvo en la malla 3/8" en estado saturado y superficialmente seco.*



*Ilustración 25 Muestra secada en parrilla eléctrica.*

Se tiene de referencia los siguientes valores:



*Tabla 11 Parámetros del porcentaje de absorción.*

Tipo de absorción.	% de absorción.
Baja.	Menor al 2%
Media.	Entre 2% y 4%
Alta.	Más del 4%

Especificaciones:

La (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) establece los términos de diseño por desempeño en durabilidad que deben de cumplir los elementos de una estructura de concreto para alcanzar la vida de servicio establecida.

Para la humedad de absorción en los agregados esta no debe de ser mayor al 5%.

#### 4.2.4. Densidad en gravas.

Tiene como objetivo determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen. Siguiendo los lineamientos adscritos en la (NMX-C-165-ONNCCE-2014, 2014)

Equipo:

- Muestra representativa de grava.
- Probeta graduada.
- Picnómetro.
- Franela.
- Charola.



### Procedimiento:

Se toma una muestra de grava saturada y superficialmente seca de 300 gramos, para obtenerlo se deja saturando la grava retenida en la malla 3/8” y que pasa la 3/4” durante 24 horas, secándola superficialmente con una franela, esta masa se registra como la masa de la muestra (M).



Se llena el picnómetro hasta el nivel del orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar la muestra de grava dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada. Cuando se haya terminado de colocar la grava dentro del picnómetro esperamos a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) de las partículas de grava.

Para este caso se usó una probeta graduada con un volumen conocido y se le añadió la muestra registrando su volumen posterior.

*Ilustración 27 Probeta graduada con el volumen total conocido añadiendo la masa de la muestra*

### Cálculos:

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

Dónde:

DG = Densidad de la grava en gr/cm<sup>3</sup>.

M = Masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

V = Volumen colocado dentro de la probeta en cm<sup>3</sup>.



Especificaciones:

La (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) establece los términos de diseño por desempeño en durabilidad que deben de cumplir los elementos de una estructura de concreto para alcanzar la vida de servicio establecida.

Para la densidad de los agregados esta debe ser mayor o igual que 2.4

#### 4.2.5. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)

Ensayo realizado para determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelta. Procedimiento descrito en (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004).

Equipo:

- Muestra representativa de grava (15 kg. Aproximadamente)
- Recipiente con un volumen de 10 litros.
- Balanza o báscula con aproximación al gramo.
- Cucharón de 1 lt.
- Pala.
- Rastrillo.

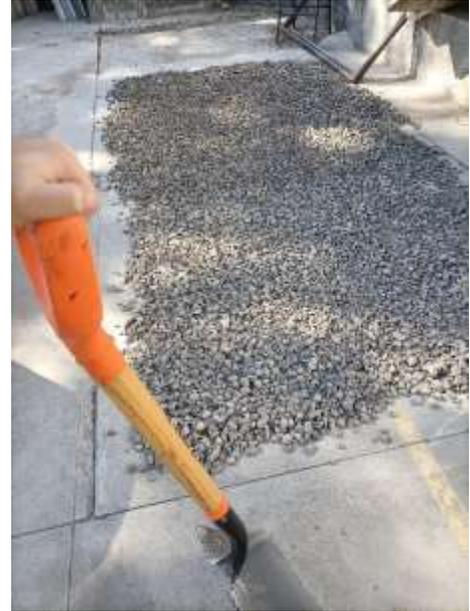
Procedimiento:



Se seca la muestra hasta masa constante, esto se puede realizar extendiendo el material con el rastrillo al sol para lograr el secado. Cuando el material este completamente seco, se continúa con el siguiente procedimiento.

Primeramente, se determina la masa y el volumen del recipiente que vamos a utilizar. Enseguida con el cucharón se va llenado el recipiente, dejando caer la grava, a la altura de 5 cm del borde superior del molde, cuidando el acomodo de las partículas sea por caída libre, esto es sin que el recipiente se someta a vibraciones hasta que quede completamente lleno y forme un cono el material.

Enseguida se procede a enrasarlo con la varilla punta de bala o con la mano que es más práctico ya que esta enrasado se pesa obteniendo así la masa del recipiente más la masa del material.



*Ilustración 28 Secado del material expuesto al calor del sol.*



*Ilustración 30 Llenado del molde con la grava suelta*



*Ilustración 29 Determinación de la masa total de la muestra*



Cálculos.

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

donde:

M.V.S.S = Masa volumétrica seca y suelta.

M = masa de la grava en gramos.

V = Volumen del recipiente en  $\text{cm}^3$

#### 4.2.6. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Esta prueba tiene como objetivo obtener la masa de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación. (NMX-C-073-ONNCCE-2004, 2004)

Equipo:

- Muestra representativa de grava (15 kg. Aproximadamente)
- Recipiente con un volumen de 10 litros.
- Balanza o báscula con aproximación al gramo.
- Cucharón de 1 lt.
- Pala.
- Varilla lisa punta de bala de 5/8”



**Procedimiento:**

Se seca la grava donde quede expuesta a los rayos del sol, se obtiene la masa y el volumen exacto del recipiente que se va a utilizar.

Enseguida con el cucharón se llena el recipiente en tres capas, cada capa deberá ser aproximadamente una tercera parte del volumen del recipiente.

Con la varilla punta de bala se le da a cada capa 25 golpes distribuyéndolo en toda la superficie, al término se enrasa el recipiente y determina su masa.

Para la captura de datos se utiliza un formato mostrado a continuación.

*Tabla 12 Formato para capturar datos de las MVSV y MVSS*

Prueba N°	Peso del recipiente (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	Peso total recipiente + material (g)	Peso de la grava compactada (g)	P.V.S.V (g/cm <sup>3</sup> )
1					
2					



*Ilustración 32 Determinando la masa total del recipiente lleno y enrasado*



*Ilustración 31 Llenado y varillado del molde con la grava seca*



Cálculos.

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

donde:

M.V.S.V = Masa volumétrica seca y varillada.

M = masa de la grava en gramos.

V = Volumen del recipiente en  $\text{cm}^3$

#### 4.2.7. Granulometría en gravas y tamaño máximo del agregado.

El objetivo de esta prueba es el de obtener la distribución de los tamaños de las partículas de la grava, así como el tamaño máximo (T.M.) de la grava, valor que se utiliza para el cálculo del diseño de mezclas (NMX-C-077-ONNCCE-2019, 2019).

Equipo.

- Muestra de aproximadamente 15 kilogramos en estado suelto.
- Juego de mallas: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4" y N° 4.
- Juego de charolas para recibir el material que se retiene en cada una de la mallas.
- Balanza o báscula con aproximación al gramo.
- Recipiente de 10 litros.



### Procedimiento:

Se seca previamente la muestra de grava, enseguida se llena el recipiente de 10 litros, previamente destarado, la grava que se utilizó para llenar el recipiente se pesa y se obtiene la masa de la muestra registrándose como masa de la muestra (Mm).

Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, ilustración 33, agitándolas con la mano para que las partículas de menor tamaño pasen a la malla siguiente, cuando se haya terminado con la muestra de grava, al realizarle este procedimiento se elabora una tabla como a continuación se indica, registrando las masas retenidas en cada una de las mallas correspondientes.



*Ilustración 33 Juego de mallas y charolas para el cribado manual.*

El tamaño máximo de la grava se obtiene observando la columna de los % retenidos y el tamaño máximo será el tamaño de la malla que retenga el 5% o más de la masa de la muestra.

Para la captura de datos y operaciones se sigue el formato siguiente:



Tabla 13 Operaciones para el cálculo de la granulometría en gravas.

Malla	Masa retenida	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
2"	(A2)	$(A3) = \frac{A2}{Mm} * 100$	$(A4) = A3$	$(A5) = 100 - A4$
1 1/2"	(B2)	$(B3) = \frac{B2}{Mm} * 100$	$(B4) = A4 + B3$	$(B5) = 100 - B4$
1"	(C2)	$(C3) = \frac{C2}{Mm} * 100$	$(C4) = B4 + C3$	$(C5) = 100 - C4$
3/4"	(D2)	$(D3) = \frac{D2}{Mm} * 100$	$(D4) = C4 + D3$	$(D5) = 100 - D4$
1/2"	(E2)	$(E3) = \frac{E2}{Mm} * 100$	$(E4) = D4 + E3$	$(E5) = 100 - E4$
3/8"	(F2)	$(F3) = \frac{F2}{Mm} * 100$	$(F4) = E4 + F3$	$(F5) = 100 - F4$
1/4"	(G2)	$(G3) = \frac{G2}{Mm} * 100$	$(G4) = F4 + G3$	$(G5) = 100 - G4$
Nº 4	(H2)	$(H3) = \frac{H2}{Mm} * 100$	$(H4) = G4 + H3$	$(H5) = 100 - H4$
Pasa Nº 4	(I2)	$(I3) = \frac{I2}{Mm} * 100$	$(I4) = H4 + I3$	$(I5) = 100 - I4$
Suma	Masa de la muestra (Mm) $\Sigma$ (A2+B2+...+I2)	$\Sigma$ (A3+B3+...+I3)=100 %	$\Sigma$ (A4+B4+...+I4)=100 %	$\Sigma$ (A5+B5+...+I5)=100 %



Especificaciones:

La (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) establece los límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa. Los valores están dados en la siguiente tabla:

Tabla 14 Límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa.

Tamaño Nominal (mm)	100 (4")	90 (3 1/2")	75 (3")	63 (2 1/2")	50 (2")	37.5 (1 1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12.5 (1/2")	9.5 (3/8")	4.75 (N° 4)	2.36 (N° 8)	1.18 (N° 16)
3 1/2" a 1 1/2"	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2 1/2" a 1 1/2"	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2" a 1"	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
2" a N° 4	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
1 1/2" a 3/4"	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
1 1/2" a N° 4	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
1" a 1/2"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
1" a N° 4	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
3/4" a N° 4	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-



½" a N° 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
3/8" a N° 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

#### 4.3. Pruebas en el cemento.

##### 4.3.1. Consistencia normal del cemento

Esta prueba tiene como objetivo obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con un determinado peso de cemento para que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado (NMX-C-057-ONNCCE-2015, 2015).

Equipo:

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



### Procedimiento:

Debido a lo laborioso de la explicación del desarrollo, lo desglosaremos en los siguientes pasos.

- Obtención de la muestra representativa de cemento.
- Preparación de la pasta de cemento.

Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.

Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje. Respecto al peso del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).

Con la espátula se lleva el material de la orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).

En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice (Aprovechando el operador a colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).

Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.

En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.

En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 centímetros, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe de repetir 6 veces terminado lo anterior.

En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos totales, descansamos la bola en la palma de la mano, se introducirá a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de



Vicat, el cual se sostendrá con la otra mano llenado completamente el anillo con pasta (la otra boca se descansará sobre un cristal). El exceso de esta que permanezca en la boca grande se removerá con un movimiento simple de la palma de la mano.

A continuación, se colocará el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa la boca superior con una pasa de boca de albañil o una espátula que se mantendrán 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.

Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un embolo se pondrán en contacto con la superficie de la pasta y se apretará el tornillo sujetador después se colocará el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hará una lectura inicial (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).



Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30s y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento (si la lectura no es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , se repite el procedimiento antes visto hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento).

*Ilustración 34 Aparato de Vicat para determinar la consistencia normal del cemento*



#### 4.3.2. Tiempos de fraguado del cemento.

El objetivo es determinar el tiempo de fraguado inicial y final del cemento hidráulico mediante la aguja de Vicat. (NMX-C-059-ONNCCE-2017, 2017)

Equipo:

- Aparato de Vicat
- Balanzas o báscula.
- Pesas.

Procedimiento:

La temperatura y humedad. Esta debe estar entre 20° y 27°C en el laboratorio, material y equipo mientras que el agua de mezclado no varía de 23°C +/- 2°C. La humedad relativa del laboratorio no será inferior de 50°C

Para la preparación de la pasta de cemento se debe de seguir el mismo procedimiento de la prueba “consistencia normal del cemento” mezclando el agua resultante necesaria para su consistencia normal.

Para el moldeado del espécimen. Con la pasta de cemento preparada como se indica en la prueba de consistencia normal moldéese la pasta. (Descansando siempre el cono sobre la placa de cristal).

Inmediatamente después de terminar el moldeado colóquese el espécimen de prueba en el cuarto húmedo y manténgase ahí excepto cuando vaya a realizar la prueba del tiempo de fraguado. El espécimen debe de permanecer en el molde cónico sobre la placa de vidrio durante el periodo de prueba.

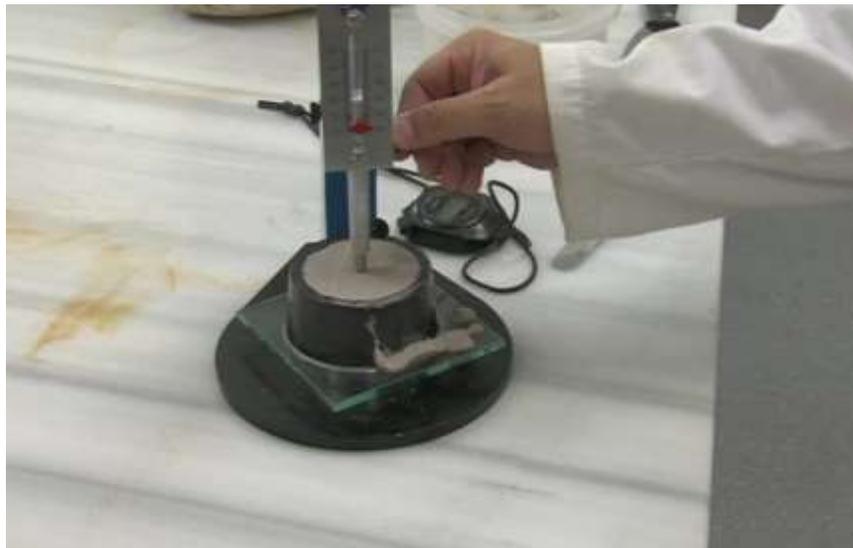
Manténgase el espécimen en el cuarto húmedo durante 30 minutos, después de moldearlo sin producirle ninguna alteración, la penetración de la aguja de un mm se determina cuando hayan transcurrido 30 minutos y de ahí en adelante cada 15 minutos (cada 10 minutos en cemento tipo III), hasta que se obtenga la penetración de 25 mm. O menos para efectuar la prueba de penetración.



Bájese la aguja de la barra hasta que descansa sobre la superficie de la pasta de cemento, apriétese el tornillo sujetador y colóquese el indicador en el extremo superior de la escala o tóme una lectura, suéltese la barra rápidamente aflojando el tornillo sujetador y permítase que la aguja penetre durante 30 segundos, entonces tóme la lectura para determinar la penetración, si es evidente que la pasta está muy suave al tomar las primeras lecturas, puede frenarse la de la barra, al fin de evitar que se flexione la aguja de un milímetro, pero la barra debe solo soltarse mediante el tornillo sujetador cuando se efectúe determinaciones reales del tiempo del fraguado.

No debe de hacerse ensayos de penetración a una distancia menor de 5 mm una de otra penetración anterior, ni distante menos de un centímetro de la pared interior del molde. Los resultados de todas las penetraciones deben de registrarse y por interpolación, determinarse el tiempo correspondiente a la penetración de 25 milímetros, siendo este el tiempo de fraguado inicial.

Para el tiempo de fraguado final se siguen haciendo las penetraciones sobre la muestra hasta registrar como tiempo de fraguado final aquel en que ya no deja huella la aguja al efectuar una penetración.



*Ilustración 35 Determinación del tiempo de fraguado por medio del aparato de Vicat*



#### Referencias:

De acuerdo a la (NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2017) establece que, para el tipo de cemento de clase CPC 30 RS el tiempo de fraguado inicial debe estar entre 45 minutos mínimo hasta los 600 minutos como máximo.

#### 4.4. Diseño de la Mezcla de concreto.

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir:

- Propiedades del concreto fresco
- Propiedades mecánicas del concreto endurecido.
- La inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos.

El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

El proporcionamiento de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco.
- Durabilidad.
- Resistencia.
- Apariencia uniforme del concreto endurecido.
- Economía.



Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades citadas arriba se pueden alcanzar en la construcción de concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla. (Kosmatka, 2004)

Antes que se pueda determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerándose el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (resistencia mecánica) requeridas para la estructura. Las características deben reflejar las necesidades de la estructura.

Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias. Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes normalmente dificulta el control del concreto. (Kosmatka, 2004)

#### 4.4.1. Diseño por el método ACI (American Concrete Institute)

Para este método se determina la resistencia de proyecto ( $F'_c$ ) y revenimiento de acuerdo al tipo de proyecto que se lleve a cabo.

Se obtiene el tamaño máximo de la grava, esto mediante la prueba de granulometría.

De la tabla 15 se obtienen los requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire, los cuales dependen del revenimiento y el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

*Tabla 15 Agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y T.M.A.*



Una vez determinado el F'c de proyecto se hace uso de tabla 14, la cual nos indica la

Agua, kg/m <sup>3</sup> concreto para tamaño máximo, mm.								
Revenimiento cm.	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
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. de aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
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	---
Promedio recomendado de aire por incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

relación agua/cemento.

Tabla 16 Determinación de la relación agua/cemento

Relación agua/cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	--
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Para valores más exactos en caso de que la resistencia de proyecto no esté en la tabla, interpolar los resultados.

Posteriormente, se calcula el consumo de cemento al despejar éste de la fórmula  $a/c =$  relación agua - cemento.



Después, de la tabla 15 se obtiene el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto, mediante la utilización de los datos de tamaño máximo y módulo de finura obtenidos en las pruebas de caracterización de los agregados.

*Tabla 17 Volumen del agregado grueso por volumen unitario de concreto.*

Tamaño máximo del agregado, mm	Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	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	0.60
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	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Una vez obtenido el dato de la tabla anterior, éste se multiplica por la densidad de la grava y de este modo obtendremos la masa de la grava que se requiere.

Ya que se haya conocido los consumos de agua, cemento y grava, el material restante que completa un metro cúbico de concreto debe consistir en arena y aire que pueda quedar incluido.

Por último, se lleva a cabo una corrección por absorción y humedad actual de los materiales pétreos. Se sacan los valores en masa de los porcentajes de humedad de absorción y humedad actual y se hace un análisis de la cantidad de agua que se requerirá añadir a la mezcla. Esto dependerá de la cantidad de agua contenida que contenga el material al momento de hacer la mezcla.

#### 4.5. Elaboración de especímenes cilíndricos 10 x 20 cm.



El objetivo es obtener las muestras representativas del concreto colado en las diferentes partes de una estructura, ejemplo zapatas, contratrabes, trabes, losas, etc., debiendo identificarlos de acuerdo con los planos del proyecto. Dichos cilindros deberán ser probados a la edad requerida aplicando pruebas destructivas y no destructivas para posteriormente determinar la resistencia de ruptura a esfuerzo de compresión principalmente, aunque también suelen someterse a prueba de tensión, flexión, módulo de elasticidad, etc.

Los cilindros pueden ser fabricados en el laboratorio para comprobar el cálculo de un proporcionamiento o en el campo para el control de calidad de una mezcla. El siguiente procedimiento es para cilindros en campo y en laboratorio. (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016)

Equipo:

- Varilla punta de bala.
- Charola.
- Pala.
- Cucharón.
- Mazo de goma
- Moldes de cilindros de 10 x 20 centímetros, cuando el tamaño máximo nominal del agregado sea mayor entonces el diámetro de los cilindros deben de ser por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal.

Procedimiento:

Se toma una mezcla representativa en una charola o recipiente que no absorbente y se mezcla.

Se mide el revenimiento para cada muestra para cada cilindro.

Se desecha la mezcla usada para el revenimiento se mezcla y se procede a llenar los cilindros.

El llenado del cilindro metálico para que no se adhiera el concreto y no expanda respectivamente, se coloca en forma vertical y en un lugar donde no haya vibraciones.



Con el cucharón se llena el cilindro en capas de 10 centímetros y compactadas con varilla punta de bala con 25 golpes por capa cuidando:

- Llenar cada capa un poco más del nivel fijado para que la varilla penetre 25 golpes quede el nivel de capa y al final sobre pasar su volumen para poder enrasar.
- Cada capa debe de ser compacta solo en su espesor sin sobre pasar a las capas inferiores por más de dos centímetros. Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente con el mazo de goma las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla y expulsar el aire atrapado.

Se coloca la etiqueta de identificación a cada cilindro y anotando en el registro los datos siguientes.

- Localización de la muestra de cilindro en los elementos de la estructura colada de concreto.
- Revenimiento.
- Proporcionamiento.
- F<sup>o</sup>c del proyecto.
- Tipo de mezclado.
- Tipo de suministro.

La elaboración del cilindro debe de hacerse en un tiempo no mayor a 15 minutos desde su muestreo. El colado del cilindro debe de hacerse cerca de donde se va almacenar o transportarse de ahí inmediatamente después de colarlos teniendo cuidado de no inclinarlos o vibrarlos con el objeto de que no pierdan sus propiedades de acomodo.

Se les coloca una hoja de plástico resistente para que no pierda su humedad bruscamente, se deja ahí a una temperatura de 17° a 27°C durante 24 horas, que es aproximadamente su primer fraguado, para después transportarlos al laboratorio.



*Ilustración 36 Elaboración de especímenes de concreto*

#### 4.6. Elaboración de vigas de concreto de 15 cm x 15 cm x 60 cm.

Los elementos prismáticos tipo “vigas” se elaboraron para llevar a cabo las pruebas destructivas de Flexión y no destructivas como velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica y frecuencia de resonancia magnética.

Equipo.

- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Moldes prismáticos de acero de 15 cm x 15 cm x 60 cm.
- Cucharón con capacidad de 1L.
- Mazo de goma.
- Cuchara de albañil.
- Plástico para cubrir los especímenes una vez hayan sido colados.

Procedimiento.

Se engrasan los moldes antes del colado para facilitar el desmolde de las muestras, esto se hace con aceite o desmoldante cubriendo una capa ligera.



El colado de las vigas se lleva a cabo en dos capas, con la ayuda del cucharón, a cada una de ellas se le aplican 65 golpes distribuidos por toda la mezcla con la varilla punta de bala, esto para compactar el concreto. Posteriormente con la cuchara de albañil se le dan penetraciones a lo largo de toda la viga para acomodar los agregados y finalmente se levantan de los extremos y se deja caer a una altura de 5 centímetros un total de 5 veces de cada lado, esto con el fin de eliminar el aire atrapado en su interior.

Una vez terminada la segunda capa, se enrasa la superficie de la mezcla rodando la varilla punta de bala sobre la superficie o bien con el enrasador metálico de 2 pulgadas de ancho por 25 cm de largo.



*Ilustración 37 Colado de especímenes prismáticos.*

#### 4.7. Curado de los especímenes.



Este es el procedimiento empleado para evitar que el agua de la mezcla del concreto se evapore en forma rápida o bien para reintegrar al mismo la pérdida de humedad debido a los procesos de fraguado y liberación de calor. (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016)

Equipo:

- Cuarto húmedo o pila de curado.
- Cal

Procedimiento:

Para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se deben cubrir inmediatamente después de terminados, de preferencia, con una placa no absorbente y no reactiva, o con una membrana de plástico durable e impermeable. Se puede emplear yute húmedo, pero se debe cuidar de mantenerlo con humedad y evitar el contacto con el concreto hasta que los especímenes sean extraídos de los moldes.

La colocación de una membrana de plástico sobre el yute facilita conservar la humedad.

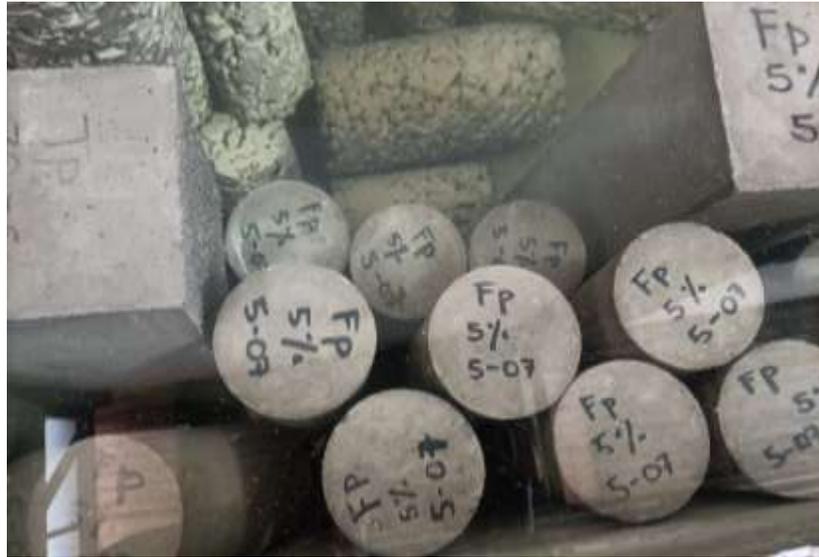
Los especímenes deben ser descimbrados entre 20 h y 48 h después de su elaboración (NMX-C-159-ONNCCE-2016, 2016).

Los tanques deben de construirse de materiales que no sean susceptibles de corrosión, dentro de un cuarto, deben estar provistos con control de temperatura. El agua debe mantenerse a una temperatura de  $296 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$  ( $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ ).

El agua en el tanque de almacenamiento debe estar saturada de cal para prevenir la lixiviación del hidróxido de calcio de los especímenes. El agua no saturada con hidróxido de calcio puede afectar los resultados de la prueba y no debe utilizarse en ninguna circunstancia. Para lograr que el agua esté saturada de hidróxido de calcio es necesario añadirle una cantidad de 3 g de hidróxido de calcio por litro de agua.



Los tanques deben lavarse y cambiarse el agua con cal en periodos no mayores a 12 meses (NMX-C-148-ONNCCE-2010, 2010).



*Ilustración 38 Curado de los especímenes cilíndricos y prismáticos*

## 4.8. Pruebas en concreto fresco

### 4.8.1. Determinación del revenimiento.

Esta práctica tiene como objetivo medir la consistencia, plasticidad y trabajabilidad del concreto fresco en término de la disminución de altura por acción del agua de mezclado, para concretos con agregados máximos nominales no mayores a 50 mm. (NMX-C-156-ONNCCE-2020, 2020)



### Equipo.

- Cono Abrams de revenimiento.
- Charola.
- Cucharón.
- Varilla punta de bala de 5/8” de diámetro.
- Pala.
- Cinta métrica o flexómetro.

### Procedimiento:

De la mezcla se obtiene una muestra representativa en una charola, se humedece el molde de revenimiento y el cucharón. Después, se coloca el molde en una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente y se sujeta colocando los pies en las orejas del molde para evitar que se mueva.

La mezcla de concreto se mezcla y se vierten en el molde con la ayuda del cucharón, se llena el cono en 3 capas aproximadamente de igual volumen, la primer capa debe llegar a una altura de aproximadamente de 7 cm, la segunda capa debe llegar a una altura aproximada de 15 cm y la tercera, al extremo del molde.

Cada capa se compacta con la varilla punta de bala aplicando 25 golpes, distribuidos uniformemente sobre la sección de cada capa. Para la segunda y tercer capa, la varilla debe penetrar por todo el espesor de las mismas, dejando que penetra aproximadamente 2 cm de la capa anterior.

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



*Ilustración 39 Muestra de concreto fresco*

Después de terminar la compactación de la última capa, se enrasa el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Se limpia la superficie exterior de la base de asiento, e inmediatamente se levanta el molde con cuidado en dirección vertical. Esta operación debe hacerse en  $5 \pm 2$  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.

Se mide 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. Si alguna porción del concreto se desliza o cae hacia un lado, se desecha el ensayo y se efectúa otra con una nueva porción de la misma muestra.



*Ilustración 41 Llenado y compactado del cono Abrams*



*Ilustración 40 Medición del revenimiento*



Las tolerancias del revenimiento están marcadas en la siguiente tabla.

*Tabla 18 Valor nominal del revenimiento y sus tolerancias aceptables*

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

#### 4.8.2. Determinación de la masa unitaria.

El objetivo de esta prueba es determinar la masa unitaria de la muestra de concreto, la masa unitaria es la cantidad de materia contenida en un metro cúbico de concreto fresco ( $\text{kg/m}^3$ ) determinado bajo la (NMX-C-162-ONNCCE-2014, 2014)

Equipo:

- Agua.
- Franela o estopa.
- Balanza o báscula.
- Vibrador interno.
- Mazo o martillo de neopreno.
- Placa de acero
- Placa enrasadora.
- Recipiente cilíndrico de metal.
- Varilla de compactación.
- Termómetro.



#### Procedimiento:

Se coloca el concreto en tres capas de igual volumen aproximadamente. Cada capa se compacta con 25 penetraciones de la varilla si el volumen es de 14 L o menos; y con 50 penetraciones si el volumen es mayor de 14 L. La varilla debe penetrar en la capa inferior en todo su espesor, pero sin golpear el fondo del recipiente. Se distribuyen las penetraciones de la varilla uniformemente en toda la superficie del concreto. Para las dos capas superiores, la varilla debe penetrar aproximadamente 20 mm en la capa inmediata inferior. Después de compactar cada capa, se deben dar ligeros golpes con el martillo o mazo a los lados del recipiente, hasta que se cierren los huecos dejados por la varilla de compactación y se liberen las burbujas o bolsas de aire que pudieran estar atrapadas. Al agregar la última capa se debe de evitar el rebosamiento.

Se llena el recipiente y se vibra el concreto en dos capas iguales aproximadamente. Se inserta el vástago del vibrador en tres puntos diferentes de cada capa evitando tocar los lados del recipiente. Durante la compactación de la capa inferior, no se debe de apoyar o tocar con el vibrador el fondo. En la compactación de la capa superior el vibrador debe penetrar en la capa anterior 20 mm aproximadamente. Se debe tener cuidado de extraer lentamente el vástago, de tal manera de no dejar burbujas de aire en el espécimen. El tiempo requerido de vibración depende de la trabajabilidad de la mezcla y de la eficiencia del vibrador. En general el vibrado es suficiente tan pronto como la superficie del concreto se vuelve relativamente lisa y el agregado grueso tiende a desaparecer.

Se debe tener cuidado de no sobrevibrar ya que esto causa segregación y pérdida de una apreciable cantidad de aire incluido y mantener una duración uniforme de vibrado para una misma clase de concreto, un mismo tipo de vibrador y un mismo recipiente.

Terminada la compactación, el recipiente no debe contener exceso o falta de concreto. El contenido óptimo es aquel en que el concreto sobresale unos 3 mm sobre el borde superior del recipiente. Se puede agregar una pequeña porción de concreto para completar la cantidad óptima. Si el recipiente contiene una cantidad considerable de concreto, este excedente se retira con una cuchara de albañil inmediatamente después de terminar la compactación y antes de que se enrase.

Se enrasa con la placa cubriendo dos tercios del perímetro del recipiente y con movimientos de sierra se cubre el otro tercio faltante. Se limpia el concreto que se pudo llegar a acumular en las paredes externas del recipiente y se pesa en una báscula calibrada y en la horizontalidad total del suelo.



*Ilustración 42 Determinación de la masa unitaria en el concreto fresco.*

Cálculos:

$$Mu = (Mb - Mr) F$$

Donde:

Mu = Masa unitaria (Masa por metro cúbico del concreto)

Mb = Masa bruta (Masa concreto más la masa del recipiente)

Mr = Masa del recipiente.

F = Factor de forma del recipiente (F = Masa volumétrica del agua / Masa de la muestra requerida para llenarlo)



#### 4.9. Pruebas no destructivas en concreto endurecido.

##### 4.9.1. Cabeceado de especímenes cilíndricos

El cabeceo de especímenes tiene como objetivo obtener la planicidad y perpendicularidad en sus bases para su ensayo, es aplicable al concreto hidráulico endurecido. El fin es la homogeneidad en toda el área del cilindro para una transmisión de cargas uniforme (NMX-C-109-ONNCCE-2010, 2010).

##### Equipo:

- Moldes de cabeceo con guías para asegurar la verticalidad.
- Aceite.
- Estopa.
- Parrilla eléctrica.
- Azufre.
- Jarra metálica para calentar azufre.

##### Procedimiento:

Se sacan los cilindros a probar del cuarto húmedo, se anotan los datos de registro.

Se pone a calentar el azufre en la jarra metálica hasta lograr que se convierta de estado sólido a estado líquido.

Se enaceita el molde de cabeceo cuyo diámetro es mayor que le del cilindro, hacemos lo mismo con la cara del cilindro a cabecear, esto para que no se pegue el azufre al molde ni al cilindro.

Una vez líquido el azufre se vierte en el molde de cabeceo a un nivel adecuado inmediatamente, se toma el cilindro y se desliza por las guías hasta sumergir su cara en el molde, se golpea suavemente en la otra cara para eliminar cualquier burbuja de aire que pueda quedar atrapado, se ajusta con las manos hacia las guías, para mantener la verticalidad y nivelar el cilindro.



Se espera un momento a que se solidifique el azufre, se retira el molde, se limpia y se repite la operación para cabecear la otra cara del cilindro.

Una vez terminado el cabeceo se deben cubrir los especímenes con un material que evite la pérdida de humedad.

La base de los especímenes de concreto endurecido tiene la opción de prepararse para su ensaye puliendo su superficie, omitiendo el cabeceo, también se puede usar placas o almohadillas de neopreno u otro material similar que sustituya el cabeceo de azufre.

Las consideraciones para el cabeceo con mortero de azufre se muestran en la tabla inferior.

*Tabla 19 Resistencia a la compresión y espesor máximo del mortero de azufre.*

Resistencia del concreto ( $\text{kg/cm}^2$ )	Resistencia mínima del mortero de azufre ( $\text{kg/cm}^2$ )	Espesor promedio máximo de cada capa de cabeceo (mm)	Espesor máximo de cada capa de cabeceo en cualquier punto de la misma (mm)
De 35 a 350	350	6	8
Más de 350	No menor que la resistencia del concreto.	3	5

A continuación se muestran las ilustraciones de su elaboración:



*Ilustración 44 Etiquetado de los especímenes*



*Ilustración 43 Cabeceo de los especímenes*



*Ilustración 45 Grosor del azufre adecuado en el cabeceo.*

#### 4.9.2. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas y cilindros y módulo de elasticidad dinámico.

El propósito de esta prueba es determinar la velocidad de propagación de ondas de compresión longitudinales a través del concreto. Se obtienen valores para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto para ondas longitudinales en la modalidad de inspección emisor - receptor.

Las pulsaciones de las ondas son generadas por un transductor (transmisor) que se mantiene en contacto con la superficie del concreto a ensayar. Después de atravesar el concreto las pulsaciones son recibidas y se convierten en energía eléctrica por un segundo transductor (receptor), localizado a una distancia,  $D$ , del transductor transmisor. El tiempo de recorrido,  $T$ , se mide electrónicamente y la velocidad del pulso,  $V$  se calcula dividiendo  $D/T$ . (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2020)



Equipo:

- Equipo Velocidad Pulso Ultrasónico.
- Acoplantes típicos como gel, vaselina o pasta de caolín.
- Marcador.
- Franela.

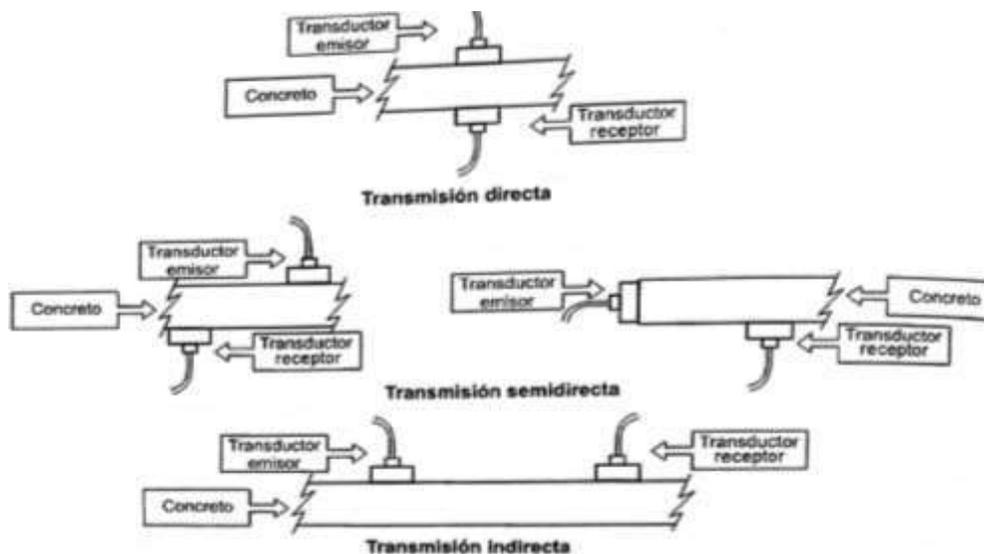
Procedimiento:

La determinación de la velocidad de pulso puede realizarse, tanto en campo, como en laboratorio, de acuerdo con el tamaño o forma del espécimen dentro de los límites apropiados para la generación de fuentes de pulsación.

Los elementos para ensayar deben estar libres de grasas o polvo antes de iniciar el ensayo.

Se debe evitar que el elemento de ensayo se encuentre sometido a vibraciones que puedan afectar los resultados.

Existen 3 formas de acomodo de los elementos o configuraciones del receptor y transmisor (directa, semidirecta e indirecta) para este caso se usó la forma directa, la cual se describe a continuación.



*Ilustración 46 Métodos de transmisión de la velocidad de pulso en el concreto tomado de la (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2020)*



Inicialmente se coloca el elemento de unión entre el concreto y el transductor (grasa, vaselina, jabón líquido o algún otro tipo de sustancia recomendada en el instructivo del equipo). Una vez calibrado el equipo se escoge el arreglo o colocación de los receptores según sean las características del elemento que se ensayaría en campo y se obtienen las medidas de tiempo.



*Ilustración 48 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros*



*Ilustración 47 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico en vigas*

Con los resultados de la velocidad de pulso ultrasónico podemos calcular el módulo de elasticidad dinámico con la siguiente fórmula:

$$E = V^2 Q \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad dinámico, MN/m<sup>2</sup>.

V = Velocidad de pulso ultrasónico km/s.

Q = Densidad kg/m<sup>3</sup>.

$\nu$  = Relación de Poisson, para nuestro caso  $\nu = 0.15$ , concretos de alta resistencia.



#### 4.9.3. Resistividad eléctrica.

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los problemas patológicos que más afectan la vida de servicio de las estructuras de concreto. Existen varios métodos para medirla y únicamente la interpretación simultánea de varios de ellos conduce a un adecuado dictamen sobre el grado de deterioro. Uno de los métodos cualitativos e indirectos para valorar el estado de deterioro por corrosión de una estructura de concreto es el de la resistividad eléctrica. Este método es económico, rápido de interpretar y no requiere un trabajo exhaustivo previo (NMX-C-514-ONNCCE-2019, 2019).

Esta prueba tiene como objetivo especificar el método de ensayo y el criterio para determinar la resistividad eléctrica del concreto hidráulico en función del tipo de exposición a un ambiente determinado, tamaño del espécimen, elemento, o estructura.

Es aplicable a elementos y/o estructuras de concreto hidráulico en los que se desee hacer un seguimiento de la resistividad eléctrica como un método indirecto para valorar el nivel de corrosión del acero de refuerzo y evaluar el riesgo de daño.

#### Equipo:

- Agua.
- Esponjas o paños.
- Flexómetro.
- Resistómetro.

#### Procedimiento.

Para la preparación del elemento. Los especímenes no deben incluir acero de refuerzo y la superficie no debe presentar carbonatación, ya que estos dos factores provocan errores en las lecturas de medición de la resistividad.

Verificar que las bases de los especímenes sean paralelas entre sí y que no presenten oquedades o discontinuidades que impidan la correcta transmisión de la corriente eléctrica a través de ellas, si es necesario corrija esto por medio de desbaste del concreto.

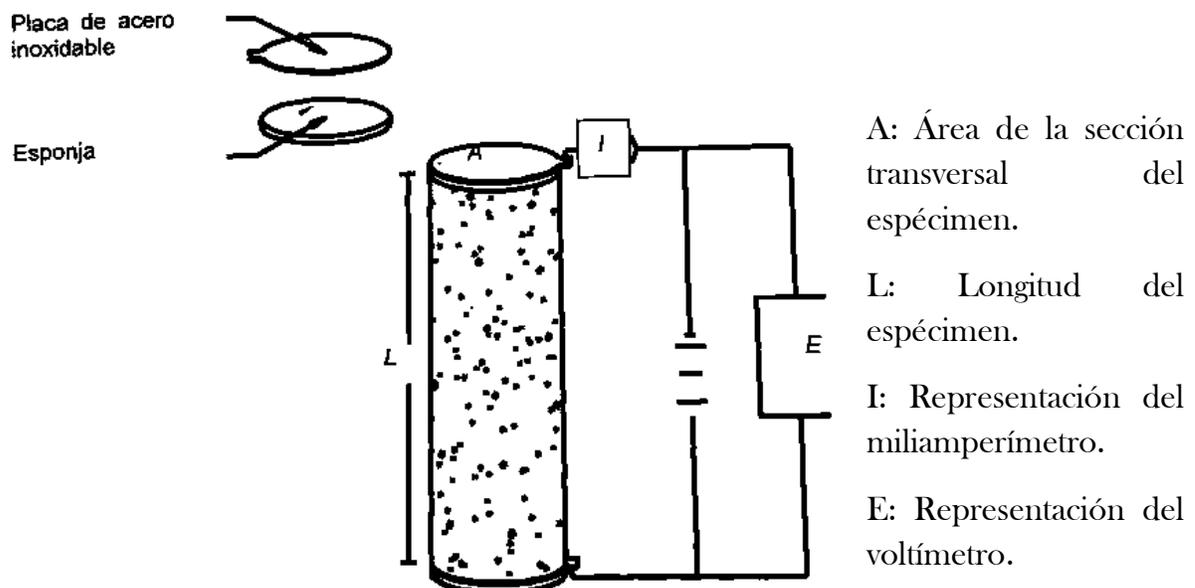


Medir el diámetro y la longitud del espécimen, con aproximación de 1.0 mm. Las medidas serán de cuando menos dos diámetros perpendiculares entre sí y dos longitudes opuestas.

Posteriormente se calcula el área geométrica,  $A$ , de cada espécimen a ensayar.

Sumergir los especímenes en agua de la red municipal, con el fin de saturar el espécimen antes de la medición. Debe de confirmarse que el espécimen este saturado de agua en su totalidad mediante la medición del peso del espécimen en el tiempo, hasta llegar a peso constante.

Después se procede al montaje de forma vertical sobre una superficie no conductora de electricidad plana y horizontal, tal como se muestra en la figura 49.



*Ilustración 49 Montaje del espécimen para medir la resistividad real por método directo.*

Colocar en las bases del espécimen esponjas húmedas presionadas con placas de acero inoxidable, que cubran al menos el área transversal del espécimen; colocar un peso sobre la superficie superior para fijar el arreglo y garantizar el contacto eléctrico.



Realizar la conexión del equipo con las placas de acero inoxidable de los extremos.

Operar el resistómetro de acuerdo al manual del proveedor y seguir las instrucciones para la aplicación de corriente (I), tomando lectura de los datos o registro del voltaje (E); realizar esta operación por lo menos en tres ocasiones para corroborar los resultados.



*Ilustración 51 Prueba de resistividad eléctrica en laboratorio.*



*Ilustración 50 Resistómetro marca Nilson usado en las pruebas.*

Cálculos:

$$\rho = R_c \left( \frac{A}{L} \right)$$

Dónde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica en  $K\Omega$ -cm (ohm-m).

$R_c$  = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en  $K\Omega$ .

$A$  = Área transversal del espécimen en  $cm^2$ .

$L$  = Longitud del espécimen en cm.



#### 4.9.4. Frecuencia de resonancia en vigas y determinación del módulo de elasticidad dinámico de Young.

Tiene como objetivo determinar las frecuencias fundamentales transversal, longitudinal y torsional de prismas y cilindros de concreto con el propósito de calcular el módulo dinámico de elasticidad de Young, el módulo dinámico de rigidez (algunas veces designado como el módulo de elasticidad al corte) y la relación dinámica de Poisson.

Su objetivo es detectar cambios significativos en los módulos dinámicos de elasticidad en especímenes de laboratorio, o de campo, que se sometan a la exposición de intemperismo u otros tipos de influencias potencialmente deteriorantes en algunos casos se puede usar para evaluar la uniformidad del concreto de campo, pero no puede ser tomado como índice de resistencia a la compresión o a la flexión, ni tampoco como una prueba adecuada para establecer la dependencia del módulo de elasticidad del concreto elaborado en el campo, con el que se tomó en cuenta para propósitos de diseño.

La comparación de los resultados de especímenes de concreto de diferentes tamaños o formas, debe hacerse con precaución debido a que se pueden calcular valores diferentes para el módulo dinámico de elasticidad como resultado de la gran variedad de frecuencias de resonancia que se registran en especímenes de diferentes tamaños y formas, elaboradas con el mismo concreto (NMX-C-089-ONNCCE-2019, 2019).

##### Equipo:

- Circuito impulsor.
- Circuito captador o detector
- Soporte del espécimen.

##### Procedimiento:

Se pesa y se mide la longitud del espécimen a ensayar, cada medida se hará dos veces y se sacará un promedio la cual no diferirá de  $\pm 1.0 \%$

Para estas pruebas se hizo la determinación de la frecuencia longitudinal, la cual se va a detallar a continuación.



Se coloca el espécimen en el soporte de tal manera, que pueda vibrar sin restricciones significativas en los dos sentidos longitudinales. La posición del espécimen es aquella que la fuerza impulsora sea normal y al centro de la superficie de un extremo.

Se coloca la unidad captadora contra una superficie del espécimen de tal manera, que actúe en la dirección de la vibración.

Se forza el espécimen de prueba a vibrar a frecuencias variables; al mismo tiempo se observa la indicación de la salida amplificada del captador. Se registra la frecuencia de la vibración del espécimen de prueba que resulte en una indicación máxima que tenga un pico bien definido sobre el indicador y en la cual la observación de los puntos nodales indica la vibración longitudinal fundamental, es decir, una frecuencia longitudinal fundamental.

Para la vibración longitudinal fundamental hay un nodo en el centro de la longitud del espécimen. Las vibraciones son máximas en los extremos.



*Ilustración 52 Determinación de la frecuencia de resonancia por medio de ondas longitudinales.*



Cálculos.

$$E = DW (n')^2$$

Donde:

E= Módulo dinámico de Young en  $\text{kg/cm}^2$

D=  $0.00519 (L/d^2)$ , en  $\text{s/cm}^2$  para un cilindro.

D=  $0.00407 (L/d^2)$ , en  $\text{s/cm}^2$  para un prisma.

$n'$ = frecuencia fundamental longitudinal, en Hz

#### 4.10. Pruebas destructivas al concreto endurecido.

##### 4.10.1. Compresión simple en cilindros de concreto

El objetivo de esta prueba, es determinar la resistencia que presenta el concreto al ser sujeto a una carga de compresión simple. Lo cual significa que se le aplicará una carga axial concéntrica al cilindro de concreto (NMX-C-083-ONNCCE-2014, 2014).

Equipo:

- Máquina de ensayo con capacidad de 120 Ton.
- Bloque de apoyo inferior de por lo menos 22.5 mm de ancho.
- Dispositivos de lectura de carga.
- Escala graduada.
- Especímenes cabeceados.



### Procedimiento:

En caso de cilindros se determina el diámetro y con ello su área, así como la altura del espécimen de ensayo, promediando según sea el caso, 2 medidas perpendiculares entre sí a la altura media del espécimen y dos alturas opuestas con una aproximación de 1 mm.

En caso de cilindros cuando la altura promedio de este sea menor de 1.8 veces su diámetro se debe de corregir por esbeltez.

Limpiar las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de ensayo, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior hace un contacto suave y uniforme.

La velocidad de aplicación de carga se debe aplicar la carga con una velocidad continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro de los intervalos indicados en la tabla 20, para otras dimensiones de diámetro o lado se calcula la velocidad de carga de acuerdo a lo especificado. Se permite una velocidad controlada mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada.

Tabla 20 Velocidad de aplicación de carga

Forma del espécimen.	Diámetro de los especímenes en cm.	Área nominal (cm <sup>2</sup> )	Carga mínima (Ton/min)	Carga máxima (Ton/Min)
Cilindro	5.0	19.64	(2,4)	(3,6)
Cilindro	7.5	44.18	(5,4)	(8,1)
Cilindro	10.0	78.54	(9,6)	(14,4)
Cilindro	15.0	176.72	(21,6)	(32,4)
Cubos	5.0	25.00	(3,1)	(4,6)
Cubos	7.5	56.25	(6,9)	(10,3)
Cubos	10.0	100.00	(12,2)	(18,4)
Cubos	15.0	225.00	(27,5)	(41,3)



Uno de cada diez especímenes se continuará la carga hasta su ruptura, para mostrar el tipo de falla y esta se registra.

Los especímenes para la aceptación o rechazo deben de ensayarse a la edad especificada con las siguientes tolerancias.

Tabla 21 Tolerancias permisibles en tiempo de prueba.

Edad de ensayo especificada.	Tolerancia permisible.
24 hr.	$\pm 0.5$ hr.
3 días	$\pm 2$ hr.
7 días	$\pm 6$ hr.
14 días	$\pm 12$ hr.
28 días	$\pm 20$ hr.
90 días	$\pm 48$ hr.

Los tipos de falla más comunes son:

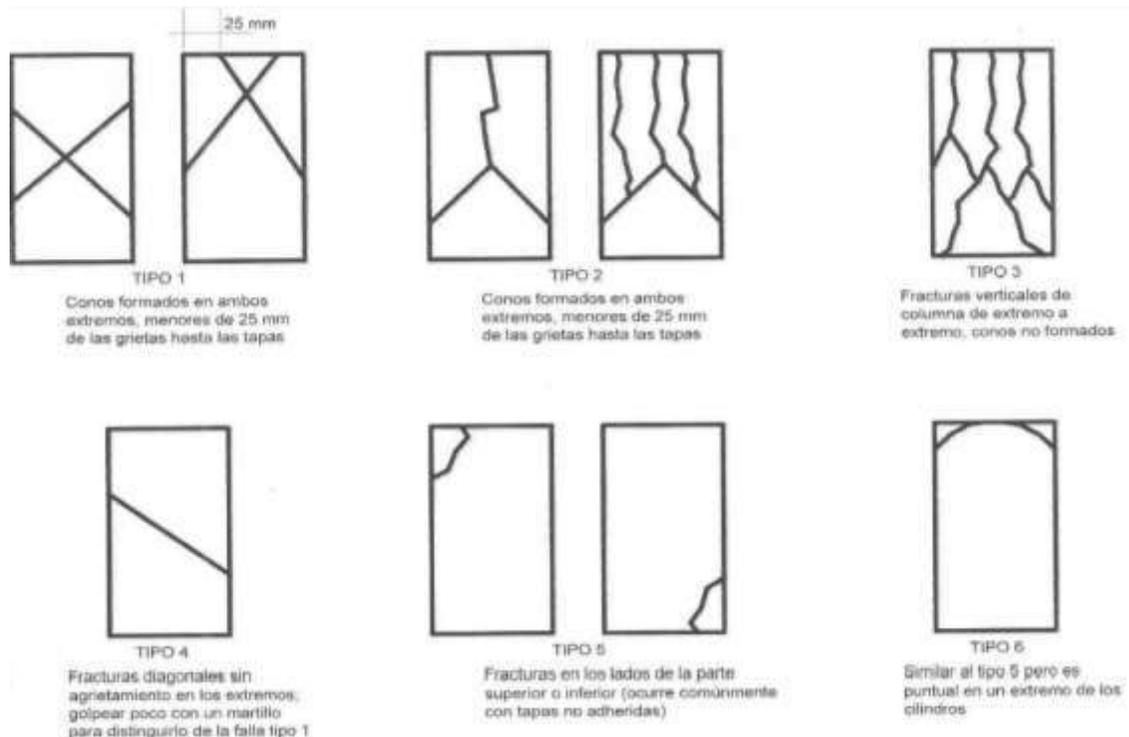


Ilustración 53 Tipos de fallas en cilindros de concreto.



Prueba de compresión en el laboratorio donde se puede observar una falla de tipo 2 (Conos formados en ambos extremos)



*Ilustración 54 Ruptura de espécimen de concreto por efecto de la compresión*

Cálculos:

$$F'c = F/A$$

Donde:

$F'c$  = Esfuerzo de compresión, ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$F$  = Carga máxima aplicada hasta el momento de falla.

$A$  = Área de la sección transversal del espécimen.



#### 4.10.2. Tensión por compresión diametral.

El objetivo de esta prueba consiste en determinar la resistencia a la tensión por compresión diametral en especímenes cilíndricos de concreto, esta norma se rige bajo la normativa. (NMX-C-163-ONNCCE-2019, 2019)

##### Equipo:

- Máquina de prueba.
- Placa o barra de carga complementaria.
- Tiras para la distribución de la carga.
- Dispositivo para trazar líneas diametrales.

##### Procedimiento:

Se determina el diámetro del espécimen de prueba con una aproximación de 0,5 mm, se calcula con el promedio de tres diámetros, medidos cerca de los extremos, al centro del espécimen y contenidos dentro del plano que incluye las líneas marcadas en los extremos.

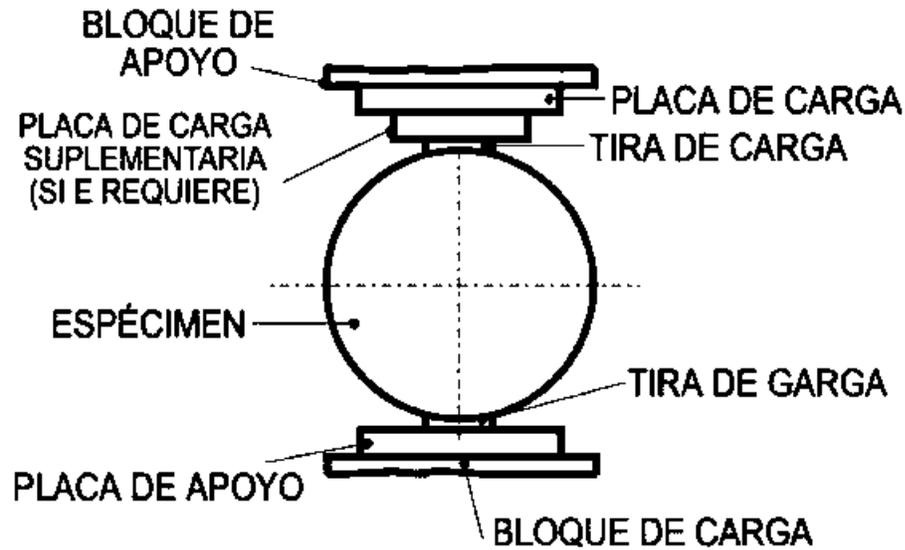
Se determina la longitud del espécimen con aproximación de 1 mm, con el promedio de por lo menos dos medidas de longitud tomadas en el plano que contienen las líneas marcadas en los extremos.

Se centra una de las tiras de carga sobre el bloque inferior. Se coloca el espécimen sobre la tira y se alinea en tal forma, que las líneas marcadas en los extremos del cilindro coincidan con el plano vertical del eje de carga. Se coloca la segunda tira de carga longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo con relación a las líneas marcadas en los extremos del mismo ilustrado en la imagen inferior. Se acomoda el conjunto para asegurar que se cumplan las condiciones anteriores.

Se debe aplicar la carga en forma continua sin impacto a una velocidad constante de tal manera, que se logren esfuerzos de tensión por compresión diametral de 0,490 MPa a 1,475 MPa ( $5 \text{ kgf/cm}^2$  a  $15 \text{ kgf/cm}^2$ ) por minuto hasta la falla del espécimen.



Para cilindros de 150 mm por 300 mm, el rango de esfuerzos de tensión corresponde a una carga aplicada aproximadamente entre 34 kN y 104 kN (3467 kgf y 10 605 kgf) por minuto.



*Ilustración 55* Espécimen colocado en la máquina

Se registra la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de prueba en el momento de la falla.



*Ilustración 57* Ruptura del espécimen por carga diametral o Tensión indirecta



*Ilustración 56* Espécimen partido a la mitad por acción de la Tensión.

Se deben observar, la forma de falla y la apariencia interna del concreto.

El resultado de dos cilindros hermanos no deberá diferir en más de 14 % del promedio, en condiciones de repetibilidad.



Cálculos.

$$T = \frac{2 P}{\pi L d}$$

Donde:

T = Resistencia a la tensión por compresión diametral, en MPa (kgf/cm<sup>2</sup>).

P = Carga máxima aplicada en kN (kgf)

L = Longitud en cm

d = Diámetro en cm

#### 4.10.3. Módulo de elasticidad estático.

El módulo de elasticidad es la relación que existe entre los esfuerzos y las deformaciones unitarias del concreto, el objetivo de esta prueba es determinarlo.

Para llevar a cabo esta prueba es necesario contar como mínimo con dos especímenes de las mismas características de elaboración, ya que se requiere llevar uno de ellos a la falla mediante la prueba de compresión simple, esto para poder calcular el 60% del esfuerzo final, lo cual nos servirá para la obtención del módulo de elasticidad del segundo espécimen (NMX-C-128-ONNCCE-2019, 2019).

Equipo:

- Máquina de pruebas a compresión con capacidad de 120 Ton.
- Deformímetros.
- Dos anillos
- Dos indicadores de carátula.



### Procedimiento:

Se determina las dimensiones del cilindro, altura y diámetro.

Se cabecean los cilindros con mortero de azufre y se monta el cilindro en la máquina de prueba, para esta experimentación se hizo uso de una prensa con capacidad de carga de 120 toneladas.

El espécimen designado para la compresión se prueba y se registra su carga de ruptura. Se determina el 60% de la carga de ruptura, esto para que al momento de medir las deformaciones aseguremos que se encuentra en un estado elástico.

Se colocan los anillos en el espécimen y se atornillan a este garantizando una completa horizontalidad y una distancia adecuada entre ellos. Además, se coloca en su lugar el micrómetro.

Se determina también del 10% al 15% de la carga de ruptura para la aplicación de dos precargas. En la primera precarga se debe revisar que el micrómetro regrese a ceros, y en la segunda precarga, además de revisar la posición final del micrómetro, se toman lecturas para verificar que se aplique bien la carga.



*Ilustración 58 Determinación del módulo de elasticidad estático*

Una vez hechas las pruebas preliminares se procede a aplicar carga a velocidad constante hasta el 50% de la carga de falla, conjuntamente se registran las deformaciones y las cargas correspondientes.

Se determina el Módulo de Elasticidad Estático.



Cálculos.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005}$$

Donde:

E= módulo de elasticidad estático en kgf/cm<sup>2</sup>.

$\sigma_1$  = Esfuerzo correspondiente a una deformación unitaria longitudinal de 50 millonésimas en kgf/cm<sup>2</sup>.

$\sigma_2$ = Esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia en kgf/cm<sup>2</sup>.

$\varepsilon_2$  = deformación unitaria longitudinal producida por  $\sigma_2$  en cm.

#### 4.10.4. Módulo de ruptura, Flexión en vigas.

El objetivo de esta prueba es la determinación a la resistencia a la flexión del concreto, usando una viga simple con cargas concentradas en los tercios del claro. Este ensayo se emplea muy frecuentemente para el control de calidad del concreto empleado en pavimentos de concreto (NMX-C-191-ONNCCE-2015, 2015) El módulo de ruptura es el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión por una viga.

Equipo:

- Máquina de prueba
- Dispositivo de aplicación de carga.
- Marcadores de tinta permanente.
- Franela o yute.
- Tiras de cuero con espesor de 5 mm a 7 mm, que cubran todo el espécimen.



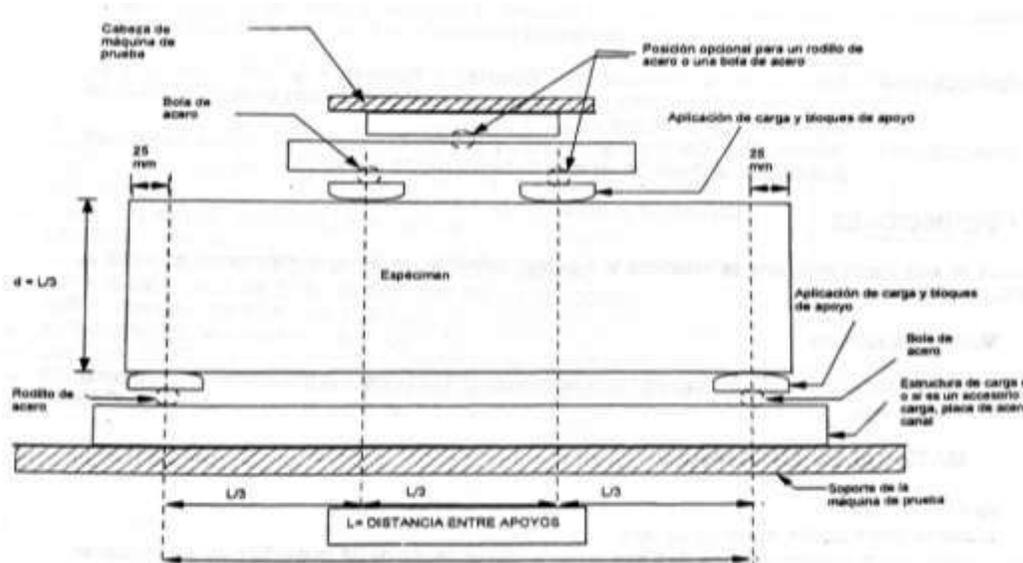
### Procedimiento:

Se voltea el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado, se centra en los bloques de apoyo y éstos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada; los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos. Cuando se usan especímenes cortados la posición del espécimen debe ser tal que la cara en tensión corresponda a la superficie superior o inferior del elemento del cual se obtuvo. Se debe tener contacto total, entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen. Se debe lijar las superficies del espécimen o bien usarse tiras de cuero, si la separación de la línea de contacto entre ellas y los bloques es mayor de 0,1 mm.

Se recomienda que el lijado de las superficies laterales de los especímenes sea mínimo, ya que puede cambiar las características físicas de las mismas y por lo tanto afectar los resultados.

Se debe utilizar tiras de cuero únicamente cuando las superficies de los especímenes en contacto con los bloques de aplicación de carga, se aparten de un plano en no más de 0,5 mm.

La carga se debe de aplicar a una velocidad uniforme de tal forma que no exceda los  $10 \text{ kgf/cm}^2$  por minuto, se pueden tener velocidades mayores antes del 50% de la carga de ruptura estimada.



*Ilustración 59 Ejemplo de un dispositivo de aplicación de carga para la prueba de resistencia a la flexión con carga a los tercios del claro.*



*Ilustración 60 Prueba de flexión en vigas*

Cálculos:

$$R = \frac{P L}{b d^2}$$

Donde:

R = Módulo de ruptura en (Kgf/cm<sup>2</sup>)

P = Carga máxima aplicada, en Kgf.

L = Longitud entre apoyos, en cm.

b = Ancho promedio del espécimen, en cm.

d = Peralte del espécimen, en cm.



## 5. Resultados.

### 5.1. Caracterización del agregado fino.

#### 5.1.1. Densidad en arena.

*Tabla 22 Densidad de la muestra de arena*

Muestra	Msss (g)	Peso probeta c/agua (g)	Peso probeta c/agua + arena (g)	Dr. sss. (g/cm <sup>3</sup> )	Dr. sss. Promedio
muestra 1	200	723.2	831.5000	<b>2.1810</b>	<b>2.1850 g/cm<sup>3</sup></b>
muestra 2	200	722.2	830.7000	<b>2.1858</b>	
muestra 3	200	722.6	831.2000	<b>2.1882</b>	

#### 5.1.2. Humedad de absorción.

*Tabla 23 Humedad de absorción en arena*

Muestra	Msss (g)	Masa seca (g)	H. Absorción (%)	Promedio H. Absorción (%)
muestra 1	300	276.395	<b>8.5403</b>	<b>8.540</b>
muestra 2	300	276.395	<b>8.5403</b>	

#### 5.1.3. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS).

*Tabla 24 Masa volumétrica seca y suelta en arena.*

Muestra	Masa del recipiente (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	Masa del recipiente más material (g)	Masa de la arena (g)	M.V.S.S (g/cm <sup>3</sup> )	M.V.S.S Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
1	2500.0	2785	5440.00	2940.00	<b>1.056</b>	<b>1.057</b>
2	2495.0	2785	5480.00	2985.00	<b>1.072</b>	
3	2495.0	2785	5405.00	2910.00	<b>1.045</b>	



#### 5.1.4. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV).

Tabla 25 Masa volumétrica seca y varillada en arena.

Muestra	Masa del recipiente (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	Masa del recipiente más material (g)	Masa de la arena (g)	M.V.S.V (g/cm <sup>3</sup> )	M.V.S.V Promedio (g/cm <sup>3</sup> )
1	2500.0	2785	5725.00	3225.00	<b>1.158</b>	<b>1.151</b>
2	2495.0	2785	5730.00	3235.00	<b>1.162</b>	
3	2495.0	2785	5655.00	3160.00	<b>1.135</b>	

#### 5.1.5. Análisis granulométrico.

Para mayor certeza y confiabilidad de los resultados se hicieron dos pruebas de granulometría en la arena. Las cuales se muestran a continuación.

Tabla 26 Primer análisis granulométrico de la arena

Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
N° 4	4.750	1.3	0.326	0.33	99.67
N° 8	2.360	125.1	31.338	31.66	68.34
N° 16	1.180	102.0	25.551	57.21	42.79
N° 30	0.600	70.6	17.685	74.90	25.10
N° 50	0.300	49.3	12.350	87.25	12.75
N° 100	0.150	21.0	5.261	92.51	7.49
N° 200	0.074	15.2	3.808	96.32	3.68
Charola	0.000	14.7	3.682	100.00	0.00
<b>Total</b>		<b>399.2</b>	<b>100.00</b>		



Tabla 27 Segundo análisis granulométrico de la arena

Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
N° 4	4.76	0.1	0.025	0.03	99.97
N° 8	2.38	116.8	29.607	29.63	70.37
N° 16	1.19	103.5	26.236	55.87	44.13
N° 30	0.595	71.9	18.226	74.09	25.91
N° 50	0.297	48.7	12.345	86.44	13.56
N° 100	0.149	23.3	5.906	92.34	7.66
N° 200	0.074	15.3	3.878	96.22	3.78
Charola	**	14.9	3.777	100.00	0.00
<b>Total</b>		<b>394.5</b>	<b>100.00</b>		

Con los valores de las tablas se determinó el promedio del % que pasa, quedando de la siguiente manera:

Tabla 28 Porcentaje promedio de las granulometrías de la arena.

	Primera granulometría	Segunda granulometría	PROMEDIO
Malla	% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
N° 4	99.67	99.97	<b>99.82</b>
N° 8	68.34	70.37	<b>69.35</b>
N° 16	42.79	44.13	<b>43.46</b>
N° 30	25.10	25.91	<b>25.50</b>
N° 50	12.75	13.56	<b>13.16</b>
N° 100	7.49	7.66	<b>7.57</b>
N° 200	3.68	3.78	<b>3.73</b>
Charola	0.00	0.00	<b>0.00</b>



Los límites establecidos en la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) para agregado fino son los siguientes.

Tabla 29 Límites granulométricos del agregado fino

Malla	Límites (% pasa)	
	Mínimo	Máximo
3/8"	100	100
N° 4	95	100
N° 8	80	100
N° 16	50	85
N° 30	25	60
N° 50	10	30
N° 100	2	10

A continuación se muestra la curva granulométrica obtenida de la arena empleada.

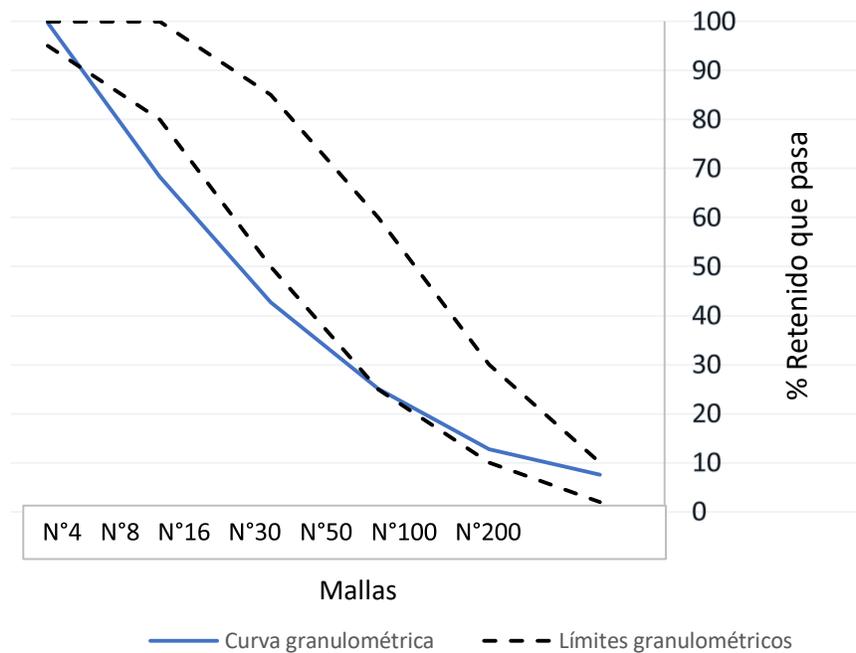


Ilustración 61 Curva granulométrica de la arena



### 5.1.6. Módulo de finura.

Tabla 30 Módulo de finura de la arena

<b>1ra. Granulometría</b>	<b>Mf= 3.43</b>
<b>2da. Granulometría</b>	<b>Mf= 3.38</b>

## 5.2. Caracterización del agregado grueso.

### 5.2.1. Densidad de la grava.

Tabla 31 Densidad de la muestra de grava

<b>Muestra</b>	<b>Msss (g)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dr sss</b>	<b>Volumen desalojado (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dr sss promedio</b>
<b>muestra 1</b>	300	300	2.7273	110	<b>2.7028 g/cm<sup>3</sup></b>
<b>muestra 2</b>	300	300	2.6786	112	
<b>muestra 3</b>	300	300	2.7027	111	

### 5.2.2. Humedad de absorción.

Tabla 32 Masa volumétrica seca y suelta de la grava

<b>Muestra</b>	<b>Msss (g)</b>	<b>Masa seca (g)</b>	<b>H. Absorción (%)</b>	<b>Promedio H. Absorción (%)</b>
<b>muestra 1</b>	300	290.5	3.2702	<b>3.2946</b>
<b>muestra 2</b>	300	289.5	3.6269	
<b>muestra 3</b>	300	291.3	2.9866	



### 5.2.3. Masa volumétrica seca y suelta (MVSS)

Tabla 33 Masa volumétrica seca y suelta de la grava (MVSS)

Muestra	Masa del recipiente (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	Masa del recipiente más material (g)	Masa de la grava (g)	M.V.S.S (g/cm <sup>3</sup> )	M.V.S.S promedio (g/cm <sup>3</sup> )
1	2895.0	10600	18450.00	15555.00	<b>1.467</b>	<b>1.483</b>
2	2895.0	10600	18790.00	15895.00	<b>1.500</b>	

### 5.2.4. Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Tabla 34 Masa volumétrica seca y varillada de la grava (MVSV)

Muestra	Masa del recipiente (g)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	Masa del recipiente más material (g)	Masa de la grava (g)	M.V.S.V (g/cm <sup>3</sup> )	M.V.S.S promedio (g/cm <sup>3</sup> )
1	2895.0	10600	19920.00	17025.00	<b>1.606</b>	<b>1.615</b>
2	2895.0	10600	20110.00	17215.00	<b>1.624</b>	



### 5.2.5. Análisis granulométrico.

Para mayor certeza y confiabilidad de los resultados se hicieron dos pruebas de granulometría en la arena. Las cuales se muestran a continuación.

*Tabla 35 Primer análisis granulométrico a la grava*

Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.1	125.000	0.801	0.801	99.199
1"	25.4	5815.000	37.264	38.065	61.935
3/4"	19.1	6155.000	39.442	77.507	22.493
1/2"	12.7	2250.000	14.418	91.926	8.074
3/8"	9.52	1000.000	6.408	98.334	1.666
1/4"	6.35	150.000	0.961	99.295	0.705
No. 4	4.76	110.000	0.705	100.000	0.000
<b>Total</b>		<b>15605.00</b>	<b>100</b>		

*Tabla 36 Segundo análisis granulométrico a la grava*

Malla	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
1 1/2"	38.1	0.050	0.000	0.000	100.000
1"	25.4	5735.000	36.470	36.471	63.529
3/4"	19.1	6665.000	42.385	78.855	21.145
1/2"	12.7	2000.000	12.719	91.574	8.426
3/8"	9.52	1095.000	6.963	98.537	1.463
1/4"	6.35	130.000	0.827	99.364	0.636
No. 4	4.76	100.000	0.636	100.000	0.000
<b>Total</b>		<b>15725.05</b>	<b>100</b>		



Con los valores de las tablas se determinó el promedio del % que pasa, quedando de la siguiente manera:

*Tabla 37 Porcentaje promedio de las granulometrías de la grava*

Malla	Abertura (mm)	% Que pasa promedio
1 1/2"	38.1	99.599
1"	25.4	62.732
3/4"	19.1	21.819
1/2"	12.7	8.250
3/8"	9.52	1.564
1/4"	6.35	0.670
No. 4	4.76	0.000

Los límites establecidos en la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) para agregado grueso son los siguientes.

*Tabla 38 Límites granulométricos del agregado grueso.*

Tamaño Nominal (mm)	100 (4")	90 (3 1/2")	75 (3")	63 (2 1/2")	50 (2")	37.5 (1 1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12.5 (1/2")	9.5 (3/8")	4.75 (N° 4)	2.36 (N° 8)	1.18 (N° 16)
3 1/2" a 1 1/2"	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2 1/2" a 1 1/2"	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2" a 1"	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
2" a N° 4	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
1 1/2" a 3/4"	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
1 1/2" a N° 4	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
1" a 1/2"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-



1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
1" a N°4	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
3/4" a N° 4	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a5	-
1/2" a N° 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
3/8" a N° 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

A continuación se muestra la curva granulométrica obtenida de la grava empleada.

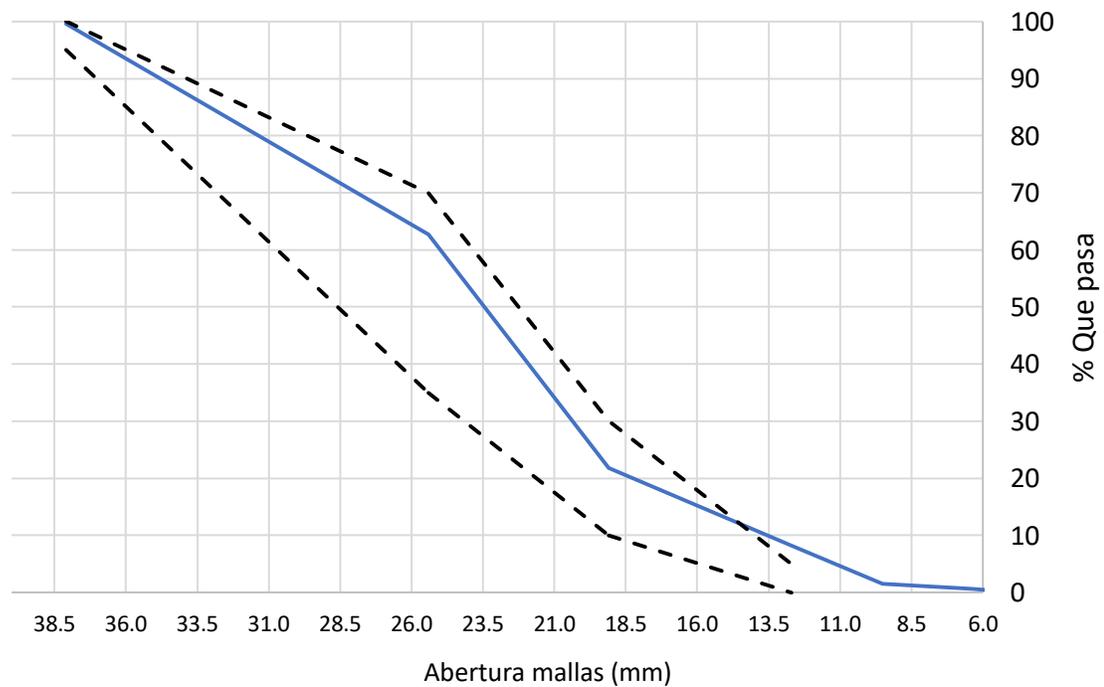


Ilustración 62 Curva granulométrica de la grava



### 5.3. Caracterización del cemento.

#### 5.3.1. Consistencia normal.

*Tabla 39 Consistencia normal del cemento*

<b>Masa de cemento %</b>	105
<b>Agua (ml)</b>	300
<b>Consistencia normal %</b>	35

#### 5.3.2. Tiempos de fraguado

*Tabla 40 Tiempos de fraguado del cemento*

<b>Fraguado inicial (min)</b>	<b>Fraguado final (min)</b>
164.0	459.0

### 5.4. Diseño de las mezclas.

#### 5.4.1. Diseño ACI

*Tabla 41 Datos para el cálculo del diseño de la mezcla*

<b>F'c:</b>	250 kg/cm <sup>2</sup>		<b>Revenimiento:</b>	15 cm			
<b>Agregado</b>	<b>MVSS (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>MVSV (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorción %</b>	<b>Humedad %</b>	<b>M. Finura</b>	<b>Tamaño máximo</b>
<b>Cemento</b>	1490	***	3050	***	***	***	***
<b>Grava</b>	1483	1615	2702	3.3	***	***	3/4"
<b>Arena</b>	1057	1151	2185	8.54	***	3.4	***



Siguiendo los pasos antes descritos en el proporcionamiento para mezclas de concreto que propone el ACI, se obtuvieron las siguientes cantidades reales de material a emplear por metro cúbico.

*Tabla 42 CANTIDADES REALES EN MASA POR METRO CÚBICO DEL DISEÑO DE ACI*

Material	Para mezcla Testigo (kg)	Para mezcla FP-5% (kg)	Para mezcla FP-10% (Kg)
Cemento	349.5	349.5	349.5
Agua (lt)	216	216	216
Arena	633.67	601.98	570.3
Grava	889.06	889.06	889.06
Plástico	0	31.69	63.37

Para la elaboración de las diferentes mezclas se utilizaron las siguientes cantidades de material:

*Tabla 43 DOSIFICACIÓN DE MATERIALES PARA CADA TIPO DE MEZCLA*

Material/agregado	Para mezcla Testigo (kg)	Para mezcla FP-5% (kg)	Para mezcla FP-10% (Kg)
Cemento	55.1	55.1	55.1
Arena	99.8	94.8	89.8
Grava	140.0	140.0	140.0
Agua	46.2	46.2	46.2
Plástico	0	4.99	10.0



## 5.5. Pruebas en concreto fresco.

### 5.5.1. Revenimiento

*Tabla 44 Revenimiento de las diferentes mezclas*

Revenimiento (cm)	Mezcla testigo	Mezcla FP-5%	Mezcla FP-10%
	16.0	17.5	17.0

### 5.5.2. Masa unitaria.

*Tabla 45 Masa unitaria del concreto fresco en las diferentes mezclas*

Masa unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	Mezcla testigo	Mezcla FP-5%	Mezcla FP-10%
	2311.0	2289.0	2276.0

## 5.6. Pruebas no destructivas en concreto endurecido.

### 5.6.1. Velocidad de pulso ultrasónico en vigas y cilindros y módulo de elasticidad dinámico.

Para esta prueba la norma (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2020) establece la clasificación del concreto de acuerdo a la velocidad de pulso, esto descrito en la siguiente tabla.

*Tabla 46 Criterio para la clasificación cualitativa de la calidad del concreto por durabilidad.*

Velocidad de propagación	Calidad del concreto
$\leq 3000$ m/s	Dudoso
3000 – 3500 m/s	Medio
3500 – 4500 m/s	Bueno
$\geq 4500$ m/s	Excelente

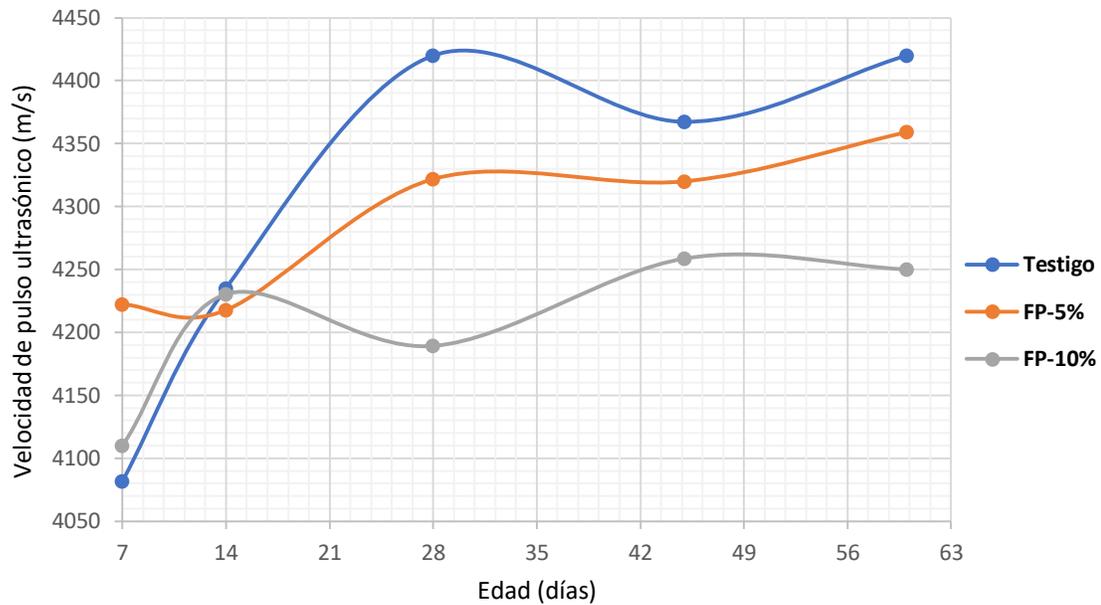


Ilustración 63 Velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas en cilindros

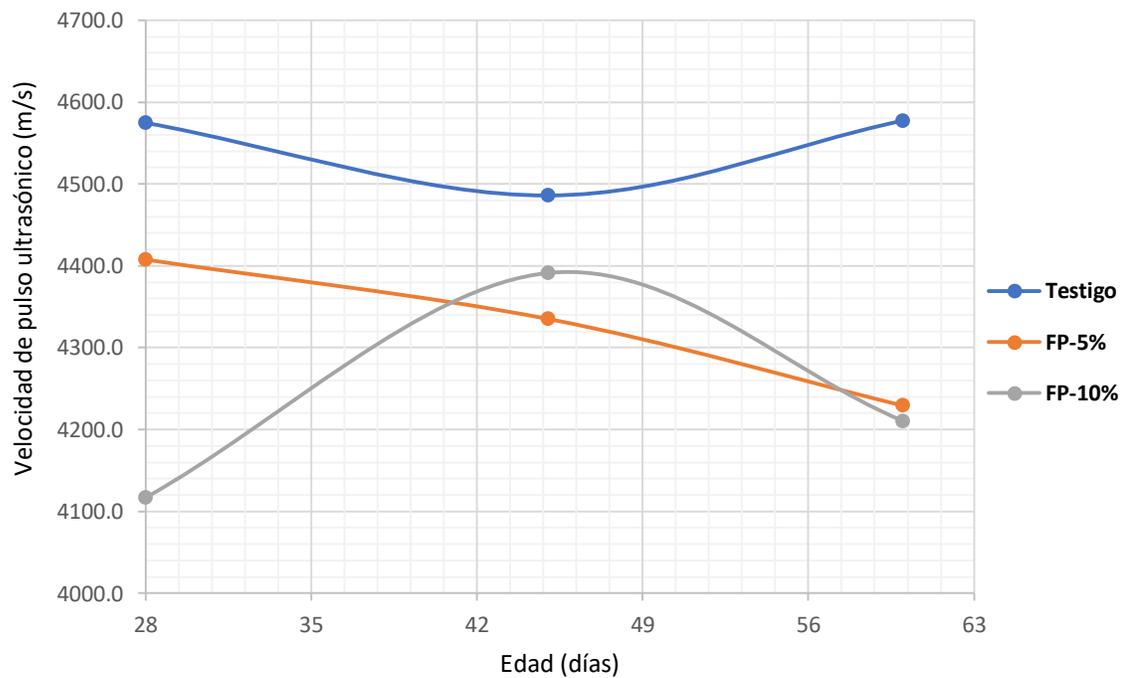
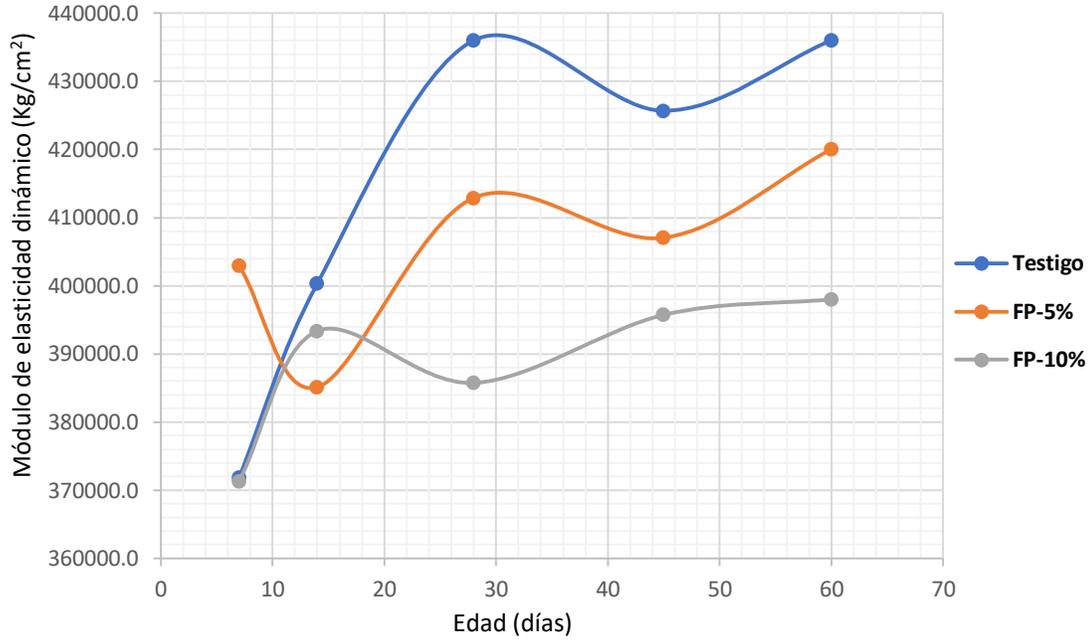


Ilustración 64 Velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas en vigas.



### 5.6.2. Módulo de elasticidad dinámico.



*Ilustración 65 Módulo de elasticidad dinámico de las mezclas.*



### 5.6.3. Resistividad eléctrica en vigas y cilindros.

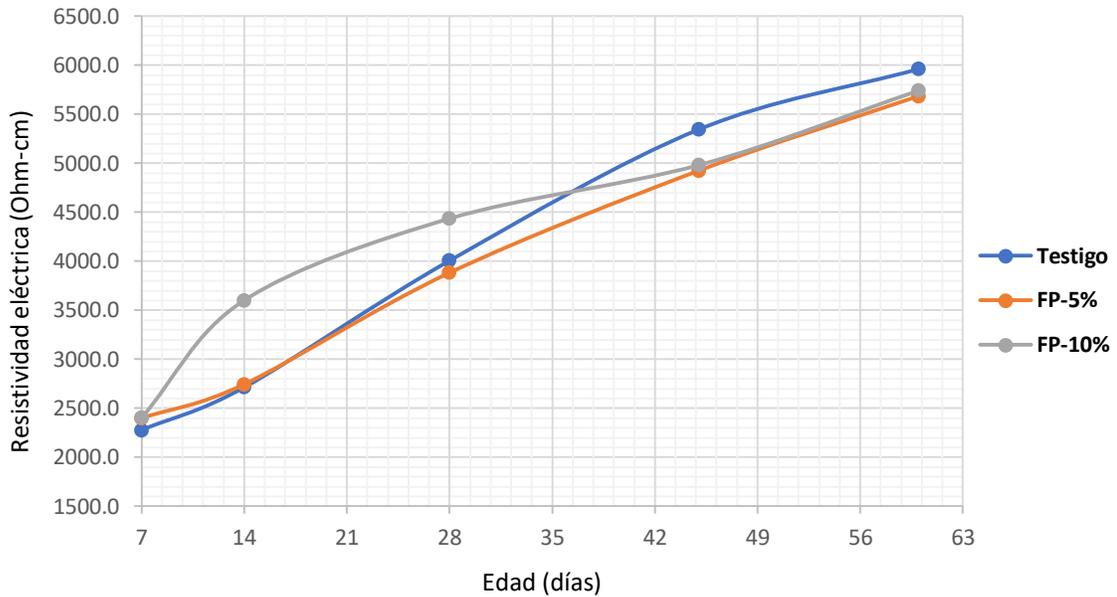


Ilustración 66 Resistividad eléctrica de las mezclas en cilindros.

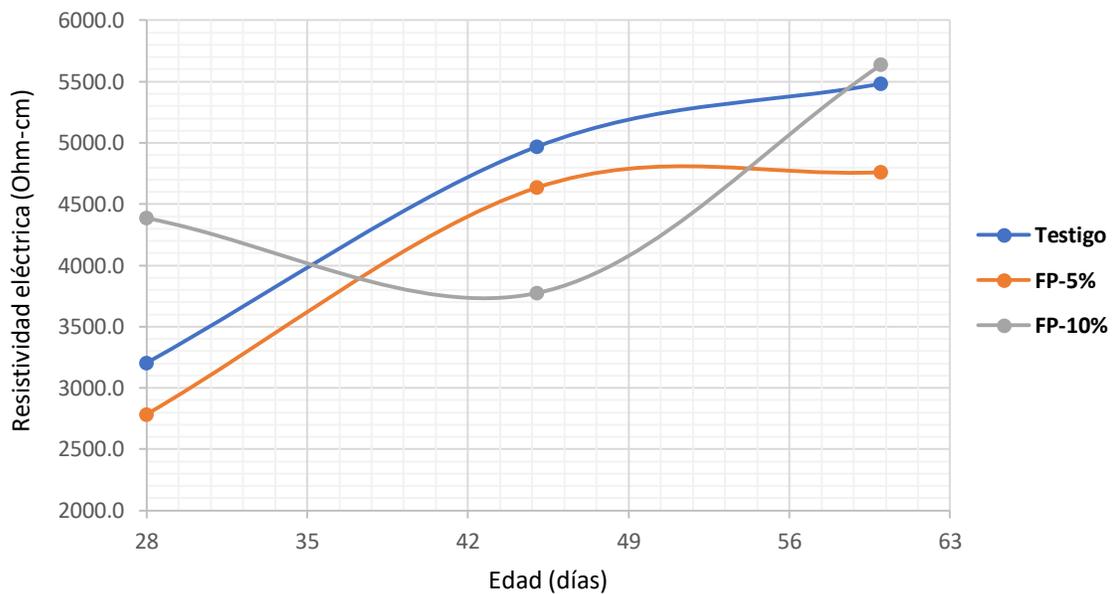
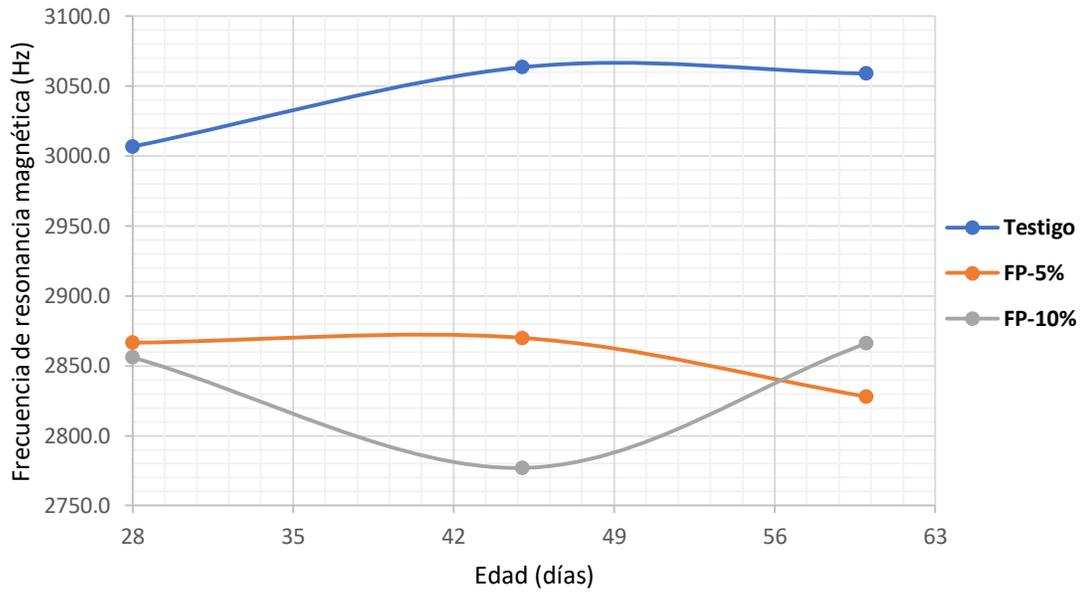


Ilustración 67 Resistividad eléctrica de las mezclas en vigas.



#### 5.6.4. Frecuencia de resonancia.

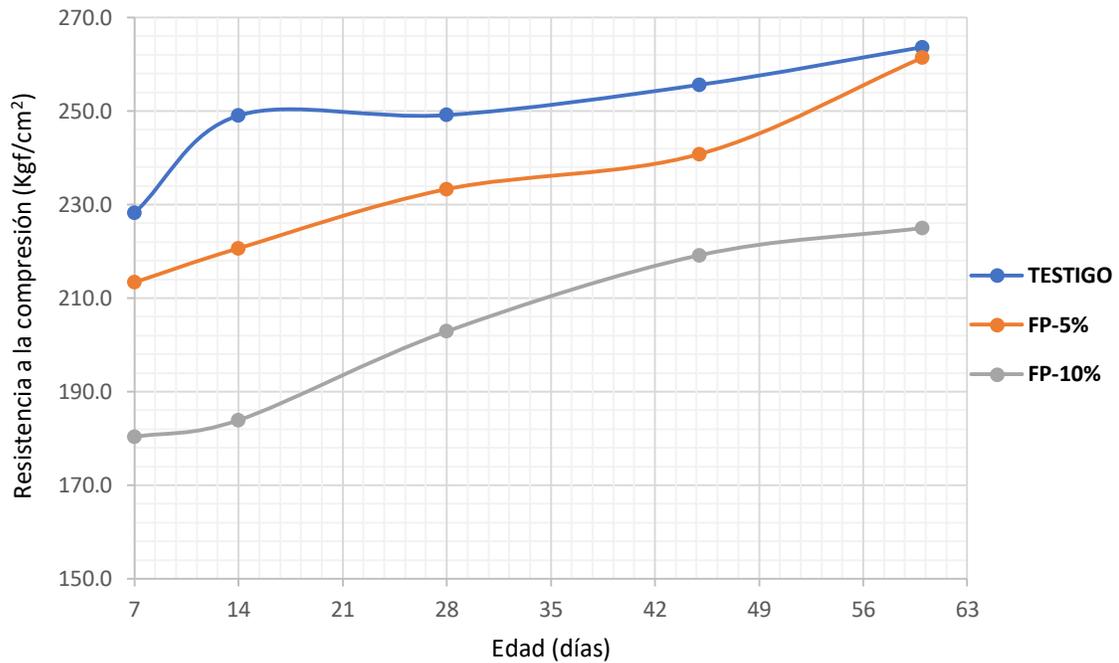


*Ilustración 68 Frecuencia de resonancia magnética en vigas.*



## 5.7. Pruebas destructivas en concreto endurecido.

### 5.7.1. Compresión simple en cilindros de concreto.



*Ilustración 69 Resistencia a la compresión de las mezclas.*



### 5.7.2. Tensión por compresión diametral.

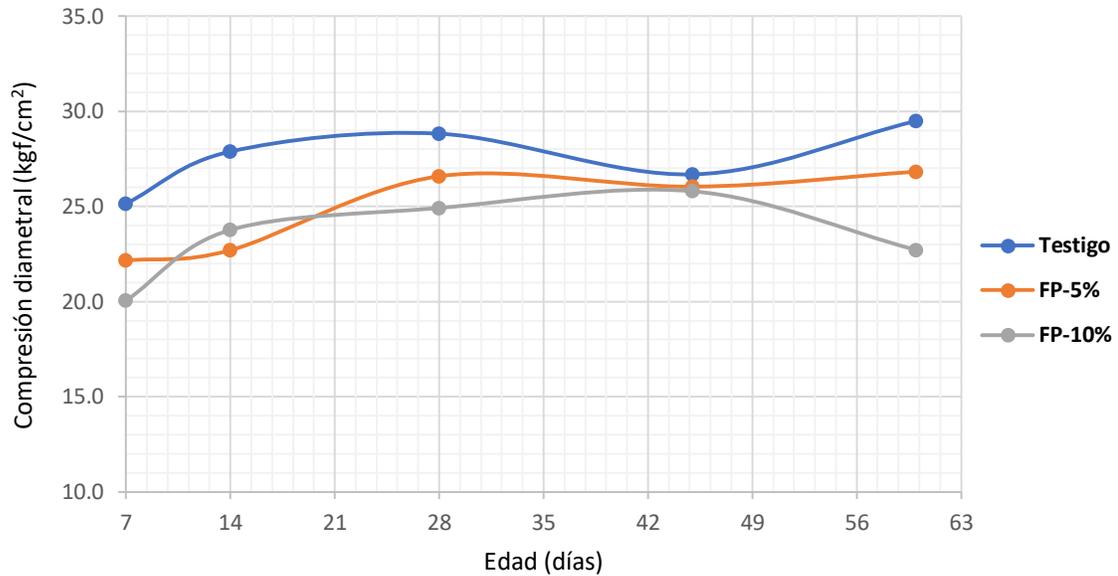


Ilustración 70 Tensión por compresión diametral de las mezclas en cilindros.

### 5.7.3. Módulo de elasticidad estático.

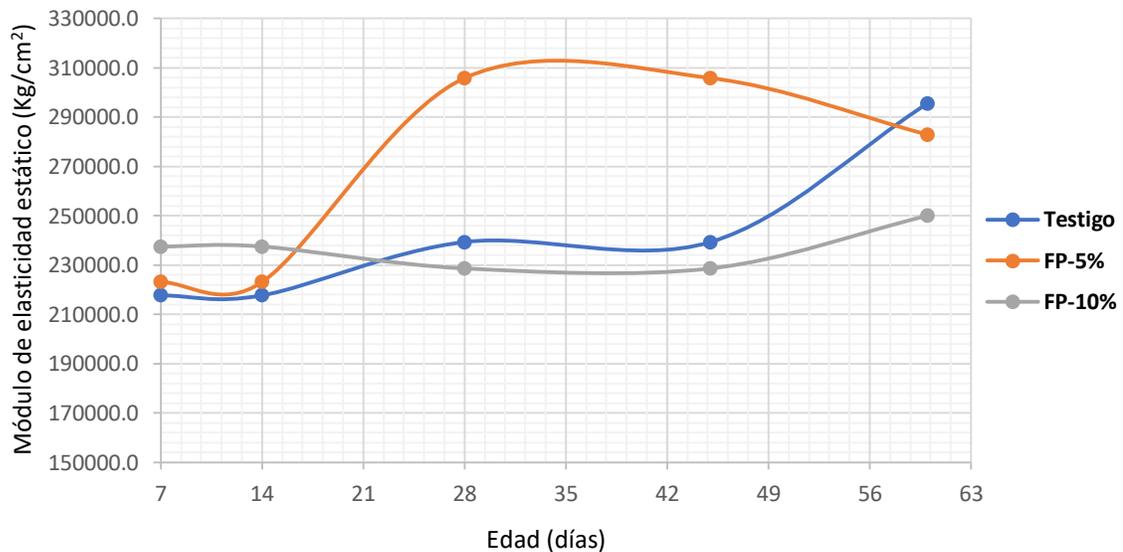
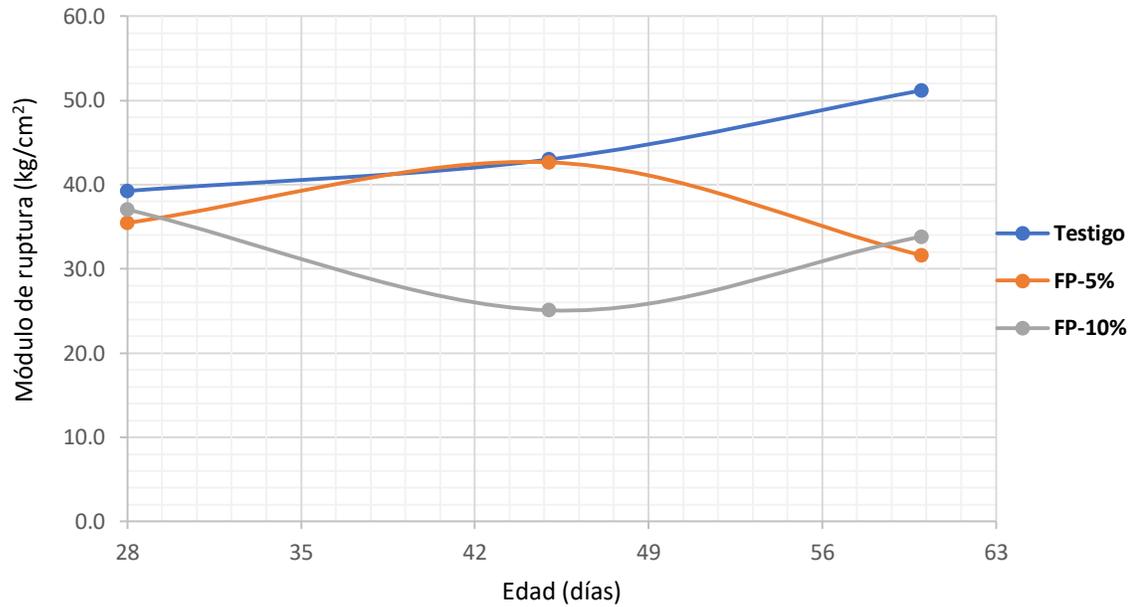


Ilustración 71 Módulo de elasticidad estático de las mezclas en cilindros.



#### 5.7.4. Módulo de ruptura por flexión.



*Ilustración 72 Módulo de ruptura por flexión en vigas.*



## 6. Análisis de resultados

### 6.1. Caracterización de los agregados.

#### 6.1.1. Agregados gruesos.

El agregado grueso se tomó del laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El material utilizado fue la “grava triturada” esta se colocó al sol para su secado y así trabajar con nula humedad, obteniendo los siguientes resultados: La humedad de absorción que presento la muestra representativa fue de 3.2946%, lo cual es un valor aceptable según el autor (Kosmatka, 2004) el cual propone valores en un rango de 0.2% a 4%.

La densidad específica tiene un valor de  $2.7028 \text{ g/cm}^3$  la cual también es un valor muy aceptado, pues el mismo autor señala que esta debería estar entre  $2.4 \text{ g/cm}^3$  y  $2.9 \text{ g/cm}^3$  así como también la (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018) indica que este valor debe ser mayor o igual a  $2.4 \text{ g/cm}^3$  lo que supone que no habría problema en la utilización de esta grava. Los valores de MVSS y MVSV son de  $1.483 \text{ g/cm}^3$  y  $1.615 \text{ g/cm}^3$  respectivamente, a lo que (Kosmatka, 2004) hace mención que el rango de estos valores va desde  $1.2 \text{ g/cm}^3$  a  $1.75 \text{ g/cm}^3$  lo cual tampoco sería un problema.

En tanto, la granulometría cumple con los límites establecidos en la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) para agregados con tamaño nominal de  $\frac{3}{4}$ ”.

Estos resultados suponen un material ideal para la elaboración de mezclas de concreto hidráulico.

#### 6.1.2. Agregados finos.

El agregado fino también se tomó del laboratorio de la facultad, se expandió en el suelo con la cautela de no perder las partículas más finas y se dejó secar al sol. Los resultados obtenidos son los siguientes: La humedad de absorción de la muestra fue de 8.54 % lo cual es un valor alto a lo especificado en la (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) que establece un valor menor o igual a 5%. La densidad específica del agregado es de 2.185



$\text{g/cm}^3$  lo cual supone un valor bajo de acuerdo a la literatura (Kosmatka, 2004) así como también a lo citado en la (NMX-C-569-ONNCCE-2020, 2020) referenciado a un valor mayor o igual a  $2.4 \text{ g/cm}^3$

Lo mismo sucede con la MVSS y MVSV que tuvieron valores de  $1.057 \text{ g/cm}^3$  y  $1.151 \text{ g/cm}^3$  respectivamente, resultando un poco bajos respecto a los que el autor (Kosmatka, 2004) señala como valores recomendados, que van desde  $1.2 \text{ g/cm}^3$  hasta  $1.75 \text{ g/cm}^3$ .

En el análisis granulométrico se determinó que la arena tiene un alto contenido de finos, quedando por debajo de los límites mínimos de acuerdo a la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018)

El módulo de finura tuvo un valor de 3.4 el cual afirma lo obtenido anteriormente en la granulometría, para fines de calidad el módulo de finura se encuentre en el rango de 2.5 y 3.0 de acuerdo a la (NMX-C-111-ONNCCE-2018, 2018) aunque puede quedar entre 2.3 y 3.1 según las especificaciones de granulometría de Bureau of reclamation ASTM-C33 y no mayor a 3.0 de acuerdo a (NMX-C-530-ONNCCE-2018, 2018).

## 6.2. Caracterización del cemento.

El cemento utilizado corresponde a un CPC 30R RS el cual arrojó valores de consistencia normal de 35% el cual está dentro del rango de valores aceptables en la literatura, estos se encuentran entre 26% y 36% (Kosmatka, 2004)

A lo que se refiere a los tiempos de fraguado, se tuvieron valores de fraguado inicial de 164 minutos y un tiempo de fraguado final de 459 minutos, y de acuerdo a la (NMX-C-414-ONNCCE-2017, 2017) el fraguado inicial mínimo será de 45 minutos y el fraguado final máximo de 600 minutos. Por lo cual se considera el cemento con características adecuadas.



### 6.3. Pruebas en concreto fresco.

#### 6.3.1. Revenimiento.

Al momento de la elaboración de las mezclas se hicieron pruebas de revenimiento obteniendo los valores de 16.0 cm, 17.5 cm y 17.0 cm. respectivamente. El revenimiento de diseño fue de 15 cm, a lo que la norma (NMX-C-156-ONNCCE-2020, 2020) especifica que en revenimientos mayores a 10 cm se tendrá una tolerancia de  $\pm 3.5$  cm. por lo que, estos valores están dentro de los parámetros de calidad establecidos.

#### 6.3.2. Masa unitaria.

Posterior al revenimiento se determinó la masa unitaria de las mezclas, arrojando los valores de  $2311 \text{ kg/m}^3$ ,  $2289 \text{ kg/cm}^3$  y  $2276 \text{ kg/cm}^3$  respectivamente. El autor (Kosmatka, 2004) indica un rango de valores que va desde  $2200 \text{ kg/m}^3$  a  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Dando como resultado valores favorables.

### 6.4. Pruebas no destructivas en concreto endurecido.

#### 6.4.1. Velocidad de pulso ultrasónico.

Los valores obtenidos en esta prueba realizada en cilindros de concreto de la mezcla testigo van desde los 4081.7 m/s hasta los 4420.06 m/s. En la mezcla FP-5% van desde 4217.76 m/s hasta 4321.83 m/s y por último la mezcla FP-10% que registró valores que van desde los 4109.99 m/s hasta 4255.32 m/s. En el caso de los elementos prismáticos para la mezcla testigo estos valores van desde los 4486 m/s hasta los 4577.43 m/s, la mezcla FP-5% alcanzó valores que van desde los 4229.50 m/s hasta los 4407.69 m/s y por último la mezcla FP-10% obtuvo valores de 4116.81 m/s hasta los 4391.26 m/s.

Se observa que en todas las mezclas los valores mínimos sobrepasan los 4080 m/s. La norma (NMX-C-275-ONNCCE-2020, 2020) indica que un criterio para la clasificación cualitativa de la calidad del concreto por durabilidad, un concreto es “bueno” si este



rango si sitúa entre los 3500 m/s y 4500 m/s, por lo que se aceptan los valores obtenidos en las muestras.

#### 6.4.2. Resistividad eléctrica.

En las pruebas realizadas a los cilindros y vigas de las tres mezclas se observa el mismo patrón, un incremento significativo de la resistividad eléctrica conforme se va aumentando su edad, pasando de 2278.49 Ohm-cm hasta los 5344.85 Ohm/cm para el caso de las mezclas testigo; La mezcla FP-5% alcanzó valores que van desde los 2399.37 Ohm/cm hasta los 5685.86 Ohm/cm y por último la mezcla FP-10% registró valores de 2403.56 Ohm/cm hasta los 5741.44 Ohm/cm.

Para el caso de las vigas de concreto la mezcla testigo obtuvo valores que van desde los 3204.42 Ohm/cm hasta los 5483.20 Ohm/cm, la mezcla FP-5% obtuvo valores de 2784.62 Ohm/cm hasta 4760.57 Ohm/cm así como la última mezcla FP-10% registró datos que van de los 3774.25 Ohm/cm a los 5636.35 Ohm/cm.

Estos valores se encuentran en la zona de alto riesgo en el pronóstico de corrosión de acuerdo a la (DURAR, 2000) ya que esta estima que un rango aceptable de durabilidad por corrosión sitúa valores mayores a los 10000 Ohm/cm.

#### 6.4.3. Frecuencia de resonancia en vigas

Para la mezcla testigo se observa una importante diferencia de valores en comparación con las mezclas con sustituciones plásticas; en la mezcla testigo se obtuvieron valores de 3006 Hz - 3059 Hz, mientras que la mezcla FP-5% registro datos de 2828 Hz - 2870 Hz y la mezcla FP-10% tuvo valores de 2777 Hz - 2866 Hz. De estos resultados se puede concluir que a mayor contenido de plástico en las mezclas la frecuencia de resonancia se disminuye. Por tal motivo, no se procedió con el cálculo del módulo de elasticidad dinámico o de Young.



## 6.5. Pruebas destructivas en concreto endurecido.

### 6.5.1. Compresión simple en cilindros de concreto.

La mezcla testigo fue la que mejor se comportó en esta prueba, obteniendo una resistencia a la compresión de  $249.04 \text{ kg/cm}^2$  a los 14 días de edad, respecto a los  $250 \text{ kg/cm}^2$  de proyecto a los 28 días. La mezcla FP-5% mantuvo una resistencia por debajo de la resistencia de proyecto durante los primeros 45 días y esta fue incrementando conforme pasaba la edad de la mezcla, al cumplir los 60 días la resistencia ya había alcanzado y superado la resistencia de proyecto. Estas dos mezclas consiguieron el 100% de la resistencia esperada.

La mezcla Fp-10% obtuvo valores máximos de  $225 \text{ kg/cm}^2$  a los 60 días, estando por debajo de la resistencia de proyecto, contando con el 90% de la resistencia esperada.

### 6.5.2. Tensión por compresión diametral.

En esta prueba las tres mezclas se comportaron de manera muy similar; se observa ligeramente un mejor desempeño en la mezcla testigo en comparación con las mezclas con sustituciones plásticas las cuales tienen valores semejantes notando difícilmente una diferencia significativa.

La literatura establece que el rango adecuado de valores para la compresión diametral debe estar entre el 8% y el 15% de la carga máxima a compresión que la mezcla soportó.

La mezcla testigo está en un rango de valores que va desde los  $25.15 \text{ kg/cm}^2$  -  $29.50 \text{ kg/cm}^2$  mismos que están dentro del rango aceptado de  $21.09 \text{ kg/cm}^2$  (8%) a  $39.55 \text{ kg/cm}^2$  (15%).

Las mezclas FP-5% y FP-10% tienen valores que van desde los  $20.05 \text{ kg/cm}^2$  -  $26.83 \text{ kg/cm}^2$  estando dentro del rango aceptable de  $20.0 \text{ kg/cm}^2$  (8%) y  $39.21 \text{ kg/cm}^2$  (15%)

En general se aceptan los valores obtenidos en las pruebas.



### 6.5.3. Módulo de elasticidad estático.

En la mezcla testigo se aprecia un incremento del módulo de elasticidad conforme aumenta la edad de la mezcla, pasando de  $217663 \text{ kg/cm}^2$  a  $295550 \text{ kg/cm}^2$  en 60 días. La mezcla FP-5% tiene un aumento del módulo de elasticidad de  $223068 \text{ kg/cm}^2$  a  $305818.05 \text{ kg/cm}^2$  en 60 días y la mezcla FP-10% pasó de  $237488 \text{ kg/cm}^2$  a  $248813.0 \text{ kg/cm}^2$  en 60 días. El autor (Kosmatka, 2004) así como de otras fuentes literarias indican valores del módulo de elasticidad respecto a la  $F'c$  del concreto; por lo tanto, para un concreto  $F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  los valores del módulo de elasticidad rondan los  $221000 \text{ kg/cm}^2$  por lo cual las mezclas se aceptan y concluyen satisfactoriamente esta prueba.

### 6.5.4. Módulo de ruptura por flexión.

Nuevamente se observa un mejor comportamiento de la mezcla testigo en comparación de las mezclas con sustituciones plásticas teniendo valores que van desde los  $39.25 \text{ kg/cm}^2$  hasta los  $51.19 \text{ kg/cm}^2$  mientras que las mezclas FP-5% y FP-10% arrojaron valores de  $25.08 \text{ kg/cm}^2$  a los  $42.65 \text{ kg/cm}^2$ . El autor (Kosmatka, 2004) propone un rango de valores idóneos los cuales van desde  $37 \text{ kg/cm}^2$  a  $50 \text{ kg/cm}^2$  para concretos con  $F'c \Rightarrow 250 \text{ kg/cm}^2$ . La mezcla testigo está dentro de este rango mientras que las dos mezclas plásticas están por debajo de estos valores.



## 7. Conclusiones.

Las mezclas con sustituciones plásticas se comportaron de manera adecuada respecto a la mezcla testigo, siendo la mezcla FP-5% la más semejante. Esta mezcla obtuvo una resistencia a la compresión axial simple de  $267.23 \text{ kg/cm}^2$  a los 60 días de edad, alcanzando el 106.9 % de la resistencia de proyecto, mientras que la mezcla FP-10% obtuvo un 90.75 % de resistencia respecto a la de proyecto a los 60 días de edad.

En la prueba de velocidad de pulso las mezclas testigo y FP-5% nuevamente arrojaron resultados muy similares entre sí, los criterios de durabilidad están a favor de estas mezclas considerándose como valores “buenos” y ya que este parámetro es ampliamente interrelacionado con factores del material dado es un excelente indicativo de la calidad del concreto.

Las mezclas se comportaron de manera deficiente en la prueba de resistividad eléctrica, por lo que se debe tener cuidado con el diseño de estas en lugares donde exista demasiada agresividad del ataque de sulfatos y cloruros y exista alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo.

En cambio las estructuras pueden ser de una durabilidad “buena” si se toman en cuenta estos factores y un periodo de retorno adecuado al tipo de edificación.

De manera general, el mejor comportamiento de las mezclas plásticas fue dado por la mezcla FP-5% la cual está por encima de las expectativas en las pruebas destructivas y estando en el límite de las pruebas no destructivas. En tanto, es posible y muy factible el uso del plástico triturado como sustitución de agregado fino en la elaboración del concreto hidráulico tanto en uso estructural como en usos no estructurales, presentando una buena alternativa para el control del plástico de desecho.



## Bibliografía

- Analisis de materiales. (2011). *Analisis de materiales, Tercera edición*. (U. M. Hidalgo, Ed.) Morelia, Michoacan, México: Morevallado S. de R.L de C.V.
- CANACEM. (2018). *CANACEM*. Obtenido de Camara Nacional del Cemento.
- CMIC. (2013). *Sector de la construcción en México*. CDMX: CMIC.
- Confederación española de fabricantes de plástico. (1991). “Los plásticos, materiales de nuestro tiempo. *ANAIP*, N/a.
- Dietz, A. G. (1973). *“Plásticos para arquitectos y constructores*. Barcelona, España.: Reverté S.A.
- DURAR. (2000). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Ernst Worrell, L. P. (2001). *Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry*. California, USA.: Electronic Reprints.
- Gobierno de Canarias. (16 de Enero de 2020). *Gobierno de Canarias*. Obtenido de Gobierno de Canarias:  
[http://www3.gobiernodecanarias.org/aciisi/cienciasmc/web/u8/contenido4.8\\_u8.html#:~:text=El%20primer%20pl%C3%A1stico%20fue%20la,llam%C3%B3%20a%20la%20sustancia%20celuloide](http://www3.gobiernodecanarias.org/aciisi/cienciasmc/web/u8/contenido4.8_u8.html#:~:text=El%20primer%20pl%C3%A1stico%20fue%20la,llam%C3%B3%20a%20la%20sustancia%20celuloide).
- Kosmatka, S. H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois EEUU: PCA Portland cement association.
- Miguel Rivas, O. G. (10 de Marzo de 2021). *Impacto de la contaminación por plásticos en la biodiversidad y patrimonio biocultural de México*. Obtenido de Heinrich Boll Stiftung: <https://mx.boell.org/es/2021/03/10/impacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural>
- Neville. (1999). *Tecnología del concreto*. México, CDMX.: Instituto mexicano del cemento y del concreto.
- NMX. (s.f.).
- NMX-C-057-ONNCCE-2015. (2015). *Cementantes hidráulicos -Determinación de la consistencia normal-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-059-ONNCCE-2017. (2017). *Cementantes hidráulicos -Determinación del tiempo de fraguado por el método de Vicat-*. ONNCCE.



- NMX-C-073-ONNCCE-2004. (2004). *masa volumétrica-método de prueba*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE-2019. (2019). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Ensayo*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014. (2014). *Determinación de la resistencia a la compresión en especímenes de concreto -método de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-089-ONNCCE-2019. (2019). *Determinación de las frecuencias fundamentales, transversal, longitudinal y torcional de especímenes de concreto -Especificaciones y métodos de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-109-ONNCCE-2010. (2010). *Determinación del cabeceo de especímenes*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE-2018. (2018). *Agregados para concreto hidráulico -Especificaciones y métodos de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-122-ONNCCE-2019. (2019). *Agua para concreto-Especificaciones*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-128-ONNCCE-2019. (2019). *DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-148-ONNCCE-2010. (2010). *Gabinetes, cuartos húmedos y tanques de alacemamiento -Condiciones de diseño y operación-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-156-ONNCCE-2020. (2020). *DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-159-ONNCCE-2016. (2016). *Elaboración y curado de especímenes de ensayo*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-162-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación de la masa unitaria, cálculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-163-ONNCCE-2019. (2019). *Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo*. México, DF.: ONNCCE.



- NMX-C-165-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE-2020. (2020). *Determinación de la reactividad potencial*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE-2018. (2018). *-Agregados- Contenido de agua por secado-Método de ensayo*. México: Diario Oficial de la Federación.
- NMX-C-170-ONNCCE-2019. (2019). *Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los ensayos*. México: Diario oficial de la federación.
- NMX-C-191-ONNCCE-2015. (2015). *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*. ONNCCE.
- NMX-C-255-ONNCCE-2013. (2013). *Aditivos químicos para concreto -Especificaciones y métodos de ensayo-*. Mexico, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-275-ONNCCE-2020. (2020). *Determinación de la velocidad de pulso ultrasonico a traves del concreto*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE-2017. (2017). *Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Especificaciones y métodos de ensayo*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-514-ONNCCE-2019. (2019). *RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL CONCRETO HIDRAULICO -Especificaciones y método de ensayo-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-530-ONNCCE-2018. (2018). *Industria de la construcción -Durabilidad- Norma general de durabilidad de estructuras de concreto reforzado- Criterios y especificaciones-*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-569-ONNCCE-2020. (2020). *Industria de la Construcción - Durabilidad del Concreto - Diseño con Criterios de Durabilidad del Concreto Utilizado en Estructuras de Concreto con Acero de Refuerzo - Especificaciones*. México, DF.: ONNCCE.
- NMX-C-569-ONNCCE-2020. (2020). *Industria de la Construcción - Durabilidad del Concreto - Diseño con Criterios de Durabilidad del Concreto Utilizado en Estructuras de Concreto con Acero de Refuerzo - Especificaciones*. ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE-2017 . (2017). *Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo*. CDMX, México.: ONNCCE.
- PROFECO. (2020). *Contaminación por plástico*. CDMX, México.: SEGOB.



SCT. (2000). Características de los materiales. En SCT, *1 Carreteras, 01 terracerías. 008 bancos*. (pág. 7). CDMX: SCT Normativa.

SEDEMA. (2015). *Inventario de residuos sólidos*. CDMX: SEDEMA.

SEMARNAT . (2015). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. México, DF.: SEMARNAT.

Sosa, A. M. (2020). Los plásticos; materiales a la medida. *¿Como ves?*, 22-25.

Vazquez, B., & Corrales, S. (2017). *Industria del cemento en México; Análisis de sus determinantes*. (Vol. 48). CDMX, México: UNAM.