



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD
ESTÁTICO EN ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE
CONCRETO HIDRÁULICO DE 10 X 20 CM, CON
DIFERENTES $f'c$ Y CUBOS DE 15 X 15 CM

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

CARLOS FERNANDO GONZÁLEZ VILLANUEVA

ASESOR:

DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA

COASESORES:

M. en C. Judith Alejandra Velázquez Pérez



Diciembre del 2019

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, **Carlos Martin González Vaca** y **María de la Luz Villanueva Avalos**, por todo el amor, apoyo y confianza que me han dado desde que tengo memoria, siempre que he tenido cualquier tipo de problema me han ayudado a solucionarlo de una mejor manera a como yo lo haría, por brindarme una especie de refugio cuando me siento mal por cualquier cosa, regresar al hogar es siempre como un respiro para mí de todo lo que está afuera, siempre me los he tomado como ejemplo a seguir en casi todo y mientras más crezco me doy cuenta que tengo más cosas por aprender y que mejor que ayudarme con sus consejos.

A mi hermana **Valeria González Villanueva**, por siempre darme cariño y felicidad cuando le cuento mi sobre mi vida, por creer en mí, y tener confianza en mí para dejarme estar presente siempre en su vida.

A mi asesor, **Dr. Hugo Luis Chávez García**, por brindarme de sus conocimientos para la realización de esta tesis, por ayudarme cuando no sabía qué hacer y darme consejos de hacer para mejorar las cosas, lo admiro por lo que ha logrado en el ámbito académico ya que un doctorado es un gran sacrificio así como mucho empeño y aparte es muy buen maestro, y explica muy bien, que no cualquiera sabe explicar de una forma que hace parecer las cosas sencillas, aunque no lo sean, siempre lo recordare, ya que la tesis que me ayudó a crear con su asesoría estará siempre presente. Muchas gracias.

A la **Ing. Sandra del Carmen Argüello**, por todo el conocimiento transmitido, por su ayuda incondicional y por estar siempre al pendiente de mi trabajo de tesis y su desarrollo en el transcurso de esta. Muchas gracias.

Al **Ing. Noel Díaz González**, por ayudarme durante todo el recorrido practico, en donde no sabía cómo continuar con las pruebas, con dudas de procedimientos, etc. Me apoyo en todo momento y en especial desde mi primer día en esta universidad, tuve el gusto de conocerlo antes que, a todos los demás ingenieros de esta facultad, y desde hace 5 años y medio fue igual de atento conmigo como ahora en la elaboración de esta tesis. Muchas gracias.

Al **Ing. Isaías Trujillo Calderón**, por ser principalmente la persona que nos convenció a mí y a mis amigos tesisistas de hacer una tesis, y que nos dio ideas sobre qué temas podríamos usar para ello, nos incito a superarnos, nos explicó que nos iba a ayudar más hacer una tesis que un examen, por lo que se puede aprender, y nos motivó y ayudo mucho en nuestro comienzo y a pesar de que no pudo darnos el seguimiento que él deseaba siempre estuvo al pendiente y a disposición de si se nos ofrecía algo con la tesis. Muchas gracias.

A mis compañeros tesisistas **Hilda Patricia Espinoza Jiménez, Eduardo Barajas Ortiz, Mauro Anzar Sánchez**, por estar en todo momento durante el camino que fue desde tercer semestre de la carrera que, aunque no nos empezamos a tratar más hasta séptimo semestre siempre hubo una buena convivencia y también por motivarme y ayudarnos entre todos a hacer pruebas de laboratorio para nuestras tesis, también en ayudarme a no darme por vencido y seguir con la tesis, juntos hicimos nuestro tiempo más ameno en el laboratorio.

A mis amigos y conocidos **Diana Ivonne López Gómez, Michel Guzmán Ortiz, Miguel Ángel Contreras Flota, Oswaldo Farid Fernández Sánchez, Alonso Maya Ramírez, Rafael Hernández Estrada, Ing. Víctor Hugo Blancas Herrera, Ing. José Carmen García Perdomo y Ing. Luis Alberto González Luna** que nos brindaron su ayuda incondicional durante la elaboración de mezclas, en ciertas pruebas y nos estuvieron apoyando en general, a veces hasta altas horas de la noche, demostrando lo que es compañerismo en su máxima expresión, ya que ellos no ganaban nada ayudándonos y aun así lo hacían, incluso sacrificando tiempo que pudieron haber utilizado para sus propios asuntos, por eso, es lo menos que puedo hacer en esta tesis, reconocer su gran ayuda y su trabajo. Muchas gracias.

RESUMEN

En la presente investigación se desarrollaron muestras de concreto hidráulico para su estudio, se trabajó con tres mezclas de concreto hidráulico diseñadas para 150kg/cm^2 , 250kg/cm^2 y 350kg/cm^2 por el método del Instituto Americano del Concreto. Una vez realizada la caracterización de los materiales pétreos, cemento y agua se procedió a la elaboración de las mezclas de concreto para la elaboración de los especímenes de prueba. Las edades de prueba programadas fueron 3, 7, 14, 28 y 45 días y las muestras permanecieron sumergidas en agua hasta la edad de prueba.

Se realizaron pruebas no destructivas, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, y posteriormente pruebas destructivas como por ejemplo resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y resistencia a la flexión.

Finalmente, con los datos de las pruebas realizadas fue posible generar modelos de correlación para predecir el módulo de elasticidad estático de los concretos elaborados con el empleo de regresión lineal múltiple empleando como una de las variables independientes a la resistencia a la compresión obtenida en los cubos. Los factores de correlación superiores a 0.8 que ya se pueden considerar como buenos en las predicciones.

Concreto

Módulo de elasticidad

Resistencia a la compresión

Factor de correlación

Regresión lineal múltiple

ABSTRACT

In the present investigation samples of hydraulic concrete were developed for their study, we worked with three mixtures of hydraulic concrete designed for 150kg / cm², 250kg / cm² and 350kg / cm² by the method of the American Concrete Institute.

Once the characterization of the stone materials, cement and water was carried out, the concrete mixtures were elaborated for the preparation of the test specimens. The programmed test ages were 3, 7, 14, 28 and 45 days and the samples remained submerged in water until the test age.

Non-destructive tests, electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity were performed, and subsequently destructive tests such as compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity and flexural strength.

Finally, with the data of the tests carried out, it was possible to generate correlation models to predict the static elastic modulus of the concrete elaborated with the use of multiple linear regression using as one of the independent variables to the compressive strength obtained in the cubes. Correlation factors greater than 0.8 were calculated that can already be considered as good in the predictions.

HIPÓTESIS

¿Qué es la hipótesis?

En esta investigación se plantea como hipótesis la siguiente:

Con el empleo de regresión lineal múltiple es posible determinar el módulo de elasticidad a partir de muestras cubicas de concreto

Es posible determinar el módulo de elasticidad de un concreto hidráulico en un espécimen cubico

OBJETIVO

General.

Determinar Módulos de Elasticidad estáticos en muestras de concreto cilíndricas y obtener correlaciones con el esfuerzo a compresión de muestras cubicas del mismo concreto.

Específicos.

Realizar caracterización de los agregados pétreos para obtener las cantidades adecuadas de acuerdo a la metodología del ACI del diseño de mezclas de concreto.

Caracterización mecánica del concreto elaborado, muestras cilíndricas y muestras cúbicas.

INDICE

Tabla de contenido

OBJETIVO	7
1. INTRODUCCIÓN	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Materiales pétreos	14
2.2. CEMENTO	16
2.3. Cemento Portland	17
2.4. Producción del cemento portland	18
2.4.1. Explotación de materias prima	18
2.4.2. Dosificación, molienda y homogenización de materias primas	18
2.4.3. Clinkerización	19
2.4.4. Enfriamiento	19
2.4.5. Molienda de Clinker, adiciones de yeso	19
2.4.6. Empaque y distribución	19
2.5. Tipos de cemento portland	21
2.5.1. Clasificación de acuerdo a la ASTM C 150	21
2.5.2. Cementos de México	22
2.6. AGUA PARA MEZCLA DEL CONCRETO	24
2.7. IMPUREZAS ORGÁNICAS	24
2.8. IMPUREZAS INORGÁNICAS	25
2.9. CONTAMINACIÓN POR DESECHOS INDUSTRIALES	26
2.10. CONCRETO	27
2.10.1. Ventajas y desventajas del concreto	28
2.10.2. Relación agua/cemento	29
2.10.3. Durabilidad	30

2.10.4.	<i>Trabajabilidad</i>	32
2.10.5.	<i>Revenimiento</i>	33
2.11.	PRUEBAS DESTRUCTIVAS	33
2.11.1.	<i>Compresión simple</i>	33
2.11.2.	<i>Módulo de elasticidad</i>	38
2.12.	PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS	45
2.12.1.	<i>Resistividad eléctrica</i>	45
	LEY DE OHM	46
	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	48
2.12.2.	<i>Velocidad de pulso ultrasónico</i>	49
2.12.2.1.	<i>Aplicaciones del método de velocidad de pulso.</i>	51
2.13.	<i>Regresión lineal múltiple</i>	57
2.13.1.	<i>Coefficiente de correlación</i>	59
3.	METODOLOGIA	61
3.1.	<i>Materiales usados en la investigación</i>	61
3.2.	<i>Cuarteo</i>	61
3.3.	<i>Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (mvss)</i>	64
3.4.	<i>Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (mvsv)</i>	66
3.5.	<i>Análisis granulométrico en arena</i>	68
3.6.	<i>Densidad de la arena</i>	70
3.7.	<i>Muestreo en gravas</i>	73
3.8.	<i>Cuarteo de gravas</i>	75
3.9.	<i>Humedad actual en gravas</i>	77
3.10.	<i>Humedad de absorción en gravas</i>	80
3.11.	<i>Densidad en gravas</i>	82
3.12.	<i>Masa volumétrica seca y suelta en gravas (mvss)</i>	84
3.13.	<i>Masa volumétrica seca y varillada en gravas (mvsv)</i>	85
3.14.	<i>Análisis granulométrico en gravas</i>	87
3.15.	<i>Pruebas al concreto fresco</i>	88
3.15.1.	<i>Revenimiento</i>	88

3.16.	<i>Pruebas en concreto endurecido</i>	90
3.16.1.	<i>Compresión simple</i>	90
3.16.2.	<i>Módulo de elasticidad</i>	94
3.17.	<i>Pruebas no destructivas</i>	96
3.17.1.	<i>Resistividad eléctrica</i>	96
3.17.2.	<i>Velocidad de pulso ultrasónico</i>	98
4.	<i>RESULTADOS Y DISCUSIONES</i>	101
4.1.	<i>Resultados de pruebas no destructivas y destructivas en cilindros</i>	101
4.2.	<i>Resultados de pruebas no destructivas y destructivas en cubos</i>	104
4.3.	<i>Resultados de regresión lineal múltiple</i>	106
4.4.	<i>Resultados de la Granulometría</i>	109
5.	<i>CONCLUSIONES</i>	110
6.	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	111

ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1-1	Ciclo de la roca	16
Ilustración 2.4.6-1	Proceso de fabricación del Clinker	20
Ilustración 2.4.6-2	Proceso para fabricar con el Clinker el cemento Portland	20
Ilustración 2.11.1-1	Carga a compresión de un cilindro de concreto	38
Ilustración 2.11.1-2	Cilindros de concretos cabeceados listos para probar a compresión	38
Ilustración 2.11.1-3	Cilindro fracturado por carga axial en sus extremos	38
Ilustración 2.11.2-1	Curva esfuerzo deformación típica de los materiales	39
Ilustración 2.11.2-2	Zona elástica y plástica en la curva esfuerzo deformación	40
Ilustración 2.11.2-3	Cilindro con los anillos de micrómetros colocados alrededor de su eje para tomar lectura de deformación	44
Ilustración 2.12.1-1	Esquema de la prueba de resistividad eléctrica	48
Ilustración 2.12.2.1-1	Esquema de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico	52
Ilustración 2.12.2.1-2	Posibles formas de colocación de los transductores	56
Ilustración 2.12.2.1-3	Gráfica tiempo distancia de la pendiente para determinar la velocidad de pulso	57
Ilustración 2.12.2.1-4	Aparato para medir la velocidad de pulso del cilindro de concreto	57
Ilustración 3.2-1	Cuarteo de material granular fino, con divisor de muestras	63
Ilustración 3.3-1	Ilustración 3.3-2	65
Ilustración 3.3-2	Cuarteo de la arena	66

Ilustración 3.4-1	Ilustración 3.4-2	Vertido del material en el recipiente	Varillado de capas	67
Ilustración 3.4-3.	Ilustración 3.4-4.68		
Ilustración 3.5-1.	Pesado del material fino.....			69
Ilustración 3.6-1	Ilustración 3.6-2.72		
Ilustración 3.6-3.	Probeta con agua.....			72
Ilustración 3.6-4.	Probeta con agua y muestra del material cribado			72
Ilustración 3.7-1.	Secado de material			74
Ilustración 3.7-2.	Cuarteo del material			74
Ilustración 3.7-3.	Vertiendo el material en el recipiente de lamina.....			74
Ilustración 3.7-4.	Enrasado manual del material grueso.....			75
Ilustración 3.7-5.	Pesado del material			75
Ilustración 3.8-1.	Homogenización del material			76
Ilustración 3.8-2.	Aplanado del material			77
Ilustración 3.8-3.	Cuarteo del material			77
Ilustración 3.9-1.	Secado del material.....			79
Ilustración 3.9-2.	Determinación de humedad			79
Ilustración 3.9-3.	Pesado del material.....			79
Ilustración 3.10-1.	Cribado del material.....			81
Ilustración 3.11-1.	Material saturado			83
Ilustración 3.11-2.	Pesado del material.....			83
Ilustración 3.11-3.	Picnómetro desalojando un volumen de agua.....			84
Ilustración 3.12-1.	Pesado de un volumen de grava seca y suelta.....			85
Ilustración 3.13-1.	Capas de grava siendo varilladas			86
Ilustración 3.15.1-1.	Llenado de la primera capa del cono de revenimiento			89
Ilustración 3.15.1-2.	Llenando la última capa del cono de revenimiento para posteriormente aplanar la superficie.			90
Ilustración 3.15.1-3.	Midiendo el revenimiento con cinta métrica.....			90
Ilustración 3.16.1-1.	Azufre calentándose en la parrilla para cabeceo de cilindros.....			92
Ilustración 3.16.1-2.	Azufre liquido vertiéndose en el molde de cabeceo.....			92
Ilustración 3.16.1-3.	Cilindro cabeceado.....			93
Ilustración 3.16.1-4.	Cilindro y cubo de concreto a punto de ser cargados a compresión.....			93
Ilustración 3.16.2-1.	Colocación de los anillos perimetrales de medición para la deformación			94
Ilustración 3.16.2-2.	Anillos para deformación colocados y nivelados.....			95
Ilustración 3.16.2-3.	Compresora aplicando carga a cilindro para obtener módulos de deformación			95
Ilustración 3.17.1-1.	Tablero preparado de la pila de la máquina de resistividad eléctrica.....			97
Ilustración 3.17.1-2.	Cara del cilindro siendo lijada.....			97
Ilustración 3.17.1-3.	Realizando prueba de resistividad eléctrica.....			98
Ilustración 3.17.2-1.	Ilustración 3.17.2-2. 100		
Ilustración 3.17.2-3.	Colocando el impulso eléctrico al cilindro			101
Ilustración 4.1-1	Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura.....			102
Ilustración 4.1-2.	Resistividad eléctrica medida en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura.....			102

Ilustración 4.1-3. Esfuerzo a compresión en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura .	103
Ilustración 4.1-4. Módulos de elasticidad estáticos determinados en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura.....	104
Ilustración 4.2-1. Velocidad de pulso ultrasónico medida en cubos de 15cm de lado.....	104
Ilustración 4.2-2. Resistividad eléctrica obtenida en cubos de 15cm de lado.....	105
Ilustración 4.2-3. Resistencia a compresión obtenida en cubos de 15cm de lado.....	105
Ilustración 4.3-1. Predicciones obtenidas con todos los datos de pruebas no destructivas y destructivas.	107
Ilustración 4.3-2. Módulos de elasticidad estáticos obtenidos con la ecuación 21.	108
Ilustración 4.4-1.	109
Ilustración 4.4-2.	109

1. INTRODUCCIÓN

En la ingeniería civil es importante conocer la calidad del concreto hidráulico, esto se logra determinando parámetros de calidad como por ejemplo el esfuerzo a resistencia a la compresión, el esfuerzo de resistencia a la tensión, el esfuerzo de resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad, este último además se requiere como dato indispensable en el dimensionamiento de estructuras de concreto hidráulico.

El grado de contaminación de nuestro planeta en la actualidad va incrementando constante mente, por lo que es importante contribuir en la medida de lo posible en la reducción de cualquier contaminante como por ejemplo gases por el calentamiento de azufre para el cabeceo de cilindros de concreto. Actualmente, ya se consideran factores de corrección por forma al determinar la resistencia a la compresión en un espécimen con dimensiones distintas a las de un cilindro de 15cm de diámetro por 30 cm de altura. Por lo que al emplear especímenes cúbicos ahorraremos tiempo, dinero y dejaremos de contaminar nuestro planeta, desafortunadamente el determinar un módulo de elasticidad en especímenes cúbicos requiere de aditamentos costosos para medir deformaciones.

En la presente investigación se plantea una alternativa para determinar el módulo de elasticidad estático a partir de especímenes cúbicos empleando regresión lineal múltiple para generar modelos que nos permitan determinar dicho módulo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Materiales pétreos

La importancia del uso del tipo y de la calidad correcta de los agregados no se puede subestimar. Los agregados finos y gruesos ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del concreto.

Agregado Pétreo (del latín Petreus) es aquel material proveniente de la roca y se utiliza sin apenas sufrir transformaciones, se encuentran en forma de macizos rocosos o en depósitos no consolidados conteniendo regularmente fragmentos de distintos tamaños (arena y gravas). Suelen ser naturales, aunque a veces procesados o manufacturados por el hombre, derivan de la roca o poseen una calidad similar a la de ésta, siendo usados casi exclusivamente en el sector de la construcción (Olguín de la Mora, 2016).

Los agregados pétreos pueden ser clasificados de la siguiente manera:

Por su modo de fragmentación, podemos encontrar 3 tipos:

- a) Naturales. Localizados en yacimientos naturales o depósitos no consolidados, para utilizarlos sólo es necesario que sean seleccionados, refinados y clasificados por tamaños.
- b) Artificiales o manufacturados. Se localizan en macizos rocosos, para obtenerlos se emplean procedimientos de voladura con explosivos, posteriormente se limpian (despolvan), trituran y clasifican; Con este proceso se procede a utilizarlos.
- c) Industriales. Son aquellos que han pasado por diferentes procesos de fabricación, tal como productos de desecho, materiales calcinados, procedentes de demoliciones o algunos que ya han sido manufacturados y mejorados.

Por su tamaño:

- a) Grava: Es aquel material que pasa por la malla de 3" y se retiene en la malla No. 4.
- b) Arena: Es aquel material que pasa por la malla No. 4 y se retiene en la malla No. 200.

Por su Composición Mineralógica:

De acuerdo con su composición mineralógica, se cuenta con 3 tipos de agregados, y su origen se basa en el ciclo de las rocas.

- a) Agregados Ígneos: Son rocas formadas por la consolidación del magma fundido. Estas se clasifican en rocas intrusivas y extrusivas, clasificándose de acuerdo a su textura.

b) Agregados Sedimentarios: Son rocas formadas por fragmentos de rocas preexistentes que son transportados por agua, viento o hielo hasta su área de depósito, y por precipitación química de minerales por medio del agua, o por la acumulación de residuos orgánicos.

c) Agregados Metamórficos: Las rocas ígneas como las sedimentarias pueden estar sujetas a movimientos terrestres que las llevan hacia el interior a grandes profundidades en la corteza, donde son sujetas a la acción de altas temperaturas y presiones, este fenómeno de re cristalización da origen a las rocas metamórficas.

Por su Masa Unitaria:

La masa unitaria también es conocida como masa volumétrica.

a) Agregados Ligeros: Son aquellos agregados que producen concretos con masa unitaria menores que $1\,900\text{ kg/m}^3$, sin la presencia de elementos que generen aire.

b) Agregados de Masa Volumétrica Normal: Aquellos que producen concretos con masa unitaria de $1\,900\text{ kg/m}^3$ a $2\,400\text{ kg/m}^3$.

c) Pesados: Son aquellos que producen concretos con una masa unitaria mayor que $2\,400\text{ kg/m}^3$.

Y también se clasifica por color, pero eso no es relevante a la hora de caracterizar los agregados pétreos ya que el color es indiferente a características y propiedades mecánicas que son las que nos interesan para diseñar una mezcla hidráulica de concreto (Olguín de la Mora, 2016).

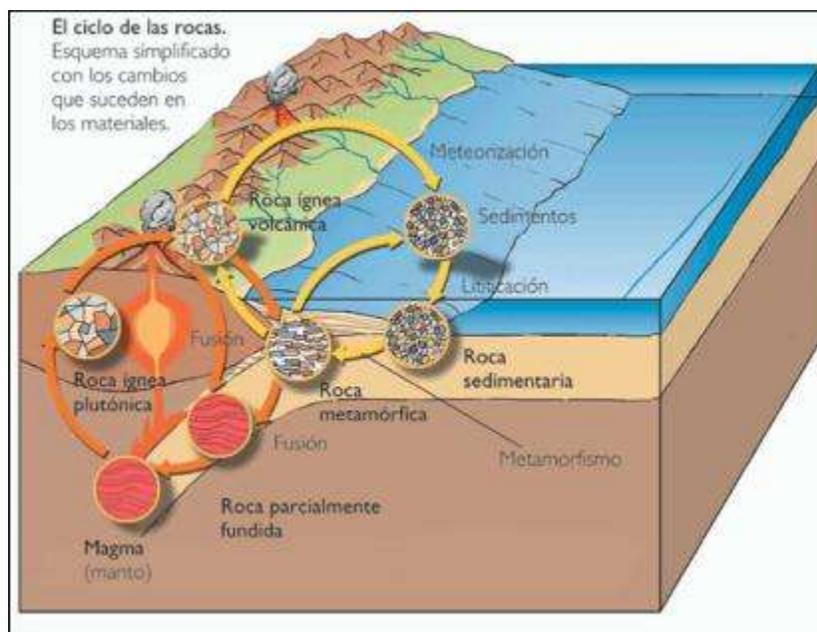


Ilustración 2.1-1 Ciclo de la roca.

Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcillas u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento. Las partículas de agregados disgregados o capaces de romperse son indeseables. Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto u otras rocas esquistosas, de materiales blandos y porosos. Se deben evitar, en especial, algunos tipos de cherts, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales tales como las erupciones (Kosmatka H. , 2004).

2.2. CEMENTO

El cemento es una sustancia o material, que es un fino polvo compuesto de caliza y arcilla que al mezclarse con agua o estar en contacto con ella comienza a provocar un fenómeno de endurecimiento que hace que sus partículas en cuestión de tiempo tengan demasiada cohesión y las adhiere con tal fuerza que la mezcla se endurezca y sirve para varias funciones constructivas como rellenar agujeros, unir piezas estructurales con otras, dar resistencia a un elemento, etc.

También hay cementos puzolánicos que son en vez de arcilla y roca caliza, con roca volcánica

Existen diferentes marcas de cementos, todas con sus patentes, diferente proceso de fabricación y diferentes cantidades de sustancia, costo y por supuesto calidad.

Eso ya dependerá de la marca, pero en general tienen propiedades parecidas y cumplen la misma función.

Antecedentes del cemento portland

Desde la antigüedad se emplearon pastas y morteros elaborados con arcilla o greda, yeso y cal para unir mampuestos en las edificaciones. El cemento se empezó a utilizar en la Antigua Grecia utilizando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, los primeros cementos naturales.

En el siglo I a. C. se empezó a utilizar en la Antigua Roma, un cemento natural, que ha resistido la inmersión en agua marina por milenios, mientras los cementos Portland no duran más de 60 años en esas condiciones; formaban parte de su composición cenizas volcánicas obtenidas en Pozzuoli, cerca del Vesubio.

En el siglo XVIII John Smeaton construye la cimentación de un faro en el acantilado de Eddystone, en la costa de Cornualles, empleando un mortero de cal calcinada. En el siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el cemento Portland, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura. En el siglo XX surge el auge y generalización de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar concreto fresco fueron ideados por Juergen Heinrich Magens que los patenta entre 1903 y 1907.

2.3. Cemento Portland

El cemento más utilizado en México es el cemento portland que es básicamente que es un aglomerante obtenido al pulverizar el Clinker con sulfatos de calcio, el Clinker es el material obtenido del horno después de calcinar la caliza con la arcilla a temperaturas de 1350 y 1450°C, eso se agrega a la mezcla y se obtiene el cemento portland.

También los hay muchos tipos de cementos en la industria, desde tipos de color, de resistencias y con agregados especiales para que cumplan funciones muy específicas alterando propiedades de este al agregar un material más a la mezcla

Algunos de los tipos de cementos en el mercado:

- (CPO) Cemento Portland Ordinario, (especialmente apto para prefabricar concretos de altas resistencias).
- (CPP) Cemento Portland Puzolánico, (resulta idóneo para obras de concreto en contacto con aguas agresivas de cualquier naturaleza y para concreto en grandes masas donde se busque evitar una gran elevación de temperatura y con ello la retracción y fisuración de origen térmico).
- Cemento Portland Escoria Granulada (CPEG).
- Cemento Portland Humo de Sílice (CPS).
- (CPC) Cemento Portland Compuesto, (es preferiblemente usado para efectos de durabilidad, resistencia química)
- Cemento Escoria Granulada (CEG).

Cemento con agregados especiales:

RS = Resistencia a Sulfatos, (Evita la reacción de los sulfatos con el hidróxido de calcio que se libera durante la hidratación del cemento para que no se generen sulfatos de calcio que ayudaran a oxidar todo el acero de una estructura de concreto).

BRA = Baja Reactividad Álcali-Agregado.

BCH = Bajo Calor de Hidratación, (Este tipo de cemento hace que se dé más difícilmente la presencia de grietas en el concreto debido al gran calor que libera la reacción exotérmica del agua con el cemento).

B = Blanco, (Esta función es más estética que para otra cosa, simplemente la mezcla al secar hará que el concreto se vea blanco, en vez de su característico color gris).

2.4. Producción del cemento portland

El proceso de fabricación empleado en determinada planta productora de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares. Básicamente las operaciones de las plantas de cemento no son iguales; pero en general todas realizan las siguientes etapas:

2.4.1. Explotación de materias prima.

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

2.4.2. Dosificación, molienda y homogenización de materias primas.

Las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

2.4.3. Clinkerización.

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

2.4.4. Enfriamiento.

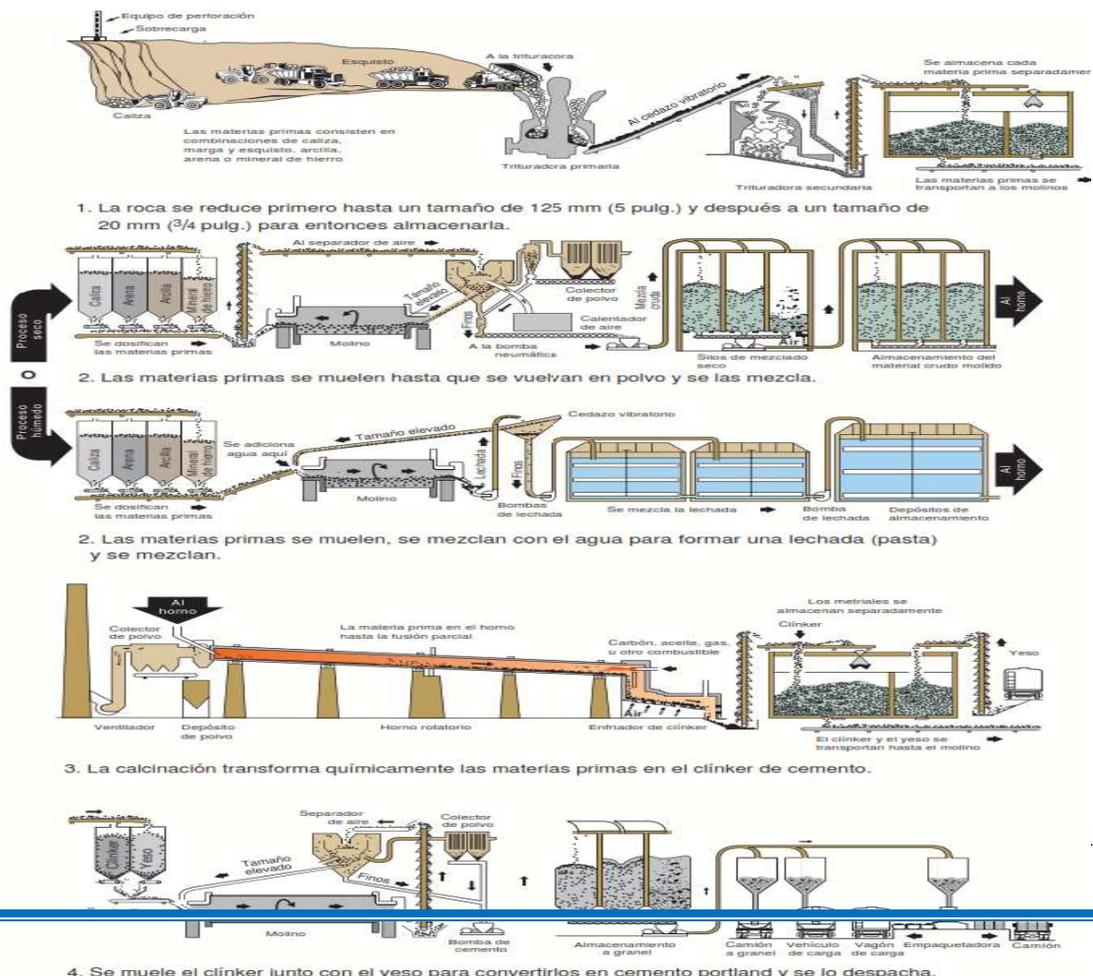
El material transformado en Clinker debe ser enfriado rápidamente a 7°C para garantizar que el cemento fabricado, después del fraguado, no presente cambio de volumen.

2.4.5. Molienda de Clinker, adiciones de yeso.

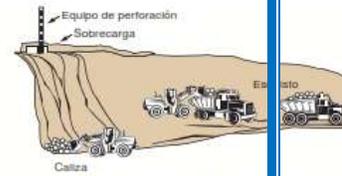
En este proceso se transforma el Clinker en polvo y se agregan las adiciones (puzolanas o escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200 y así es como se produce el cemento Portland.

2.4.6. Empaque y distribución.

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

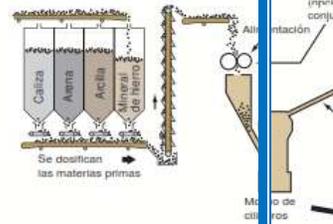


1997).

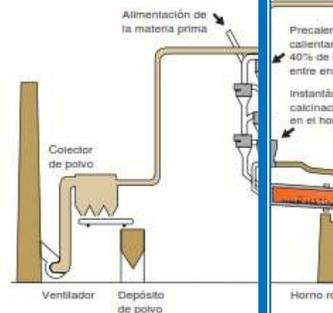


Las materias primas consisten en combinaciones de caliza, margas y esquistos, arcillas, arena o mineral de hierro

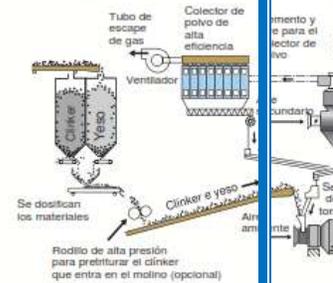
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para entonces almacenarla en silos.



2. Las materias primas se mueven hasta un molino de cilindros donde se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente el clinker en el horno instantáneo y el horno rotatorio con molienda.



4. Se muele el clinker junto con el yeso para obtener el cemento Portland.

Ilustración 2.4.6-1 Proceso de fabricación del Clinker.

Ilustración 2.4.6-2 Proceso para fabricar con el Clinker el cemento Portland.

<u>Cal, CaO</u>	<u>Hierro Fe₂O₃</u>	<u>Silice SiO₂</u>	<u>Alúmina Al₂O₃</u>	<u>Yeso o Sulfato, CaSO₄·2H₂O</u>
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Escoria de cobre	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Ceniza volante*	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Greda	
Arcilla	Esquisto	Loes	Granodiorita	
Greda		Marga*	Caliza	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Loes	
Marmol		Cuarcita	Lavaduras de mineral	
Marga*		Ceniza de arroz	Esquisto*	
Coque*		Arena*	Escoria	
Esquisto*		Arenisca	Estauroлита	
Escoria		Esquisto*		
		Basalto		

TABLA [1]

2.5. Tipos de cemento portland

Existen diferentes tipos de cemento portland con la finalidad de satisfacer distintos requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. Los cementos Portland se producen de acuerdo con las especificaciones de la ASTM.

2.5.1. Clasificación de acuerdo a la ASTM C 150

Las ASTM C 150 especificaciones de norma para el cemento portland designa ocho tipos de cemento.

Cemento	Uso
Tipo I (Portland normal)	Cemento de uso general
Tipo II (Portland moderada resistencia a los sulfatos)	Utilizado en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III (Portland fraguado rápido, alta resistencia inicial)	Cemento de alta resistencia a edades tempranas y rápido fraguado.
Tipo IV (Portland bajo calor de hidratación)	Se emplea donde se deban minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación
Tipo V (Portland alta resistencia a los sulfatos)	Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos.
Tipo IA, IIA y IIIA (con aire incluido)	Se utiliza en la fabricación de concretos con una resistencia a congelamiento y deshielo mayor

TABLA [2]

Nota. Los cementos tipo IA, IIA y IIIA son cementos con aire incluido, durante su producción, se muelen pequeñas cantidades de material incluso de aire junto con el Clinker.

2.5.2. Cementos de México

Los cementos mexicanos se especifican según la norma NMX. De acuerdo con esta norma, hay seis tipos básicos de cementos que se muestran en la tabla 3:

Tabla 3: Tipos de cementos de acuerdo a la NMX

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					
		Principales					Minoritarios
		Clinker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales Puzolánicos	Humo de sílice	Caliza	
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC	Cemento Portland Compuesto	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada De Alto Horno	20-39	61-80	-	-	-	0-5

Cementos con características especiales, se muestran en la tabla 4 :

Tabla 4: Características especiales de los cementos

Nomenclatura	Característica especial	Expansión por ataque de sulfatos	Expansión por la reacción álcali-agregado	Calor de hidratación (Max.) (Kcal/kg)	Blancura (min. %)
		1 Año	14 días 56 Días	7 días 28 días	
RS	Resistente a los sulfatos	0.1			
BRA	Baja Reactividad Álcali Agregado		0.020 0.060		
BCH	Bajo Calor de Hidratación			80 70	
B	Blanco				70

Los cementos se dividen en clases de resistencias como se muestra en la tabla 5:

Tabla 5: Clases resistentes de los cementos

Clase Resistente	Resistencia a Compresión MPa			Tiempo de Fraguado (min)	
	3 días mínimo	28 días mínimo	máximo	Inicial mínimo	Final máximo
20	-	20	40	45	600
30	-	30	50	45	600
30 R	20	30	50	45	600
40	-	40	-	45	600
40 R	30	40	-	45	600

2.6. AGUA PARA MEZCLA DEL CONCRETO

El agua de mezcla cumple dos funciones muy importantes, permitir la hidratación del cemento y hacer la mezcla manejable. De toda el agua que se emplea en la preparación de un mortero o un concreto, parte hidrata el cemento, el resto no presenta ninguna alteración y con el tiempo se evapora; como ocupaba un espacio dentro de la mezcla, al evaporarse deja vacíos los cuales disminuyen la resistencia y la durabilidad del mortero o del hormigón. La cantidad de agua que requiere el cemento para su hidratación se encuentra alrededor del 25% al 30% de la masa del cemento, pero con esta cantidad la mezcla no es manejable, para que la mezcla empiece a dejarse trabajar, se requiere como mínimo una cantidad de agua del orden del 40% de la masa del cemento, por lo tanto, de acuerdo con lo anterior como una regla práctica, se debe colocar la menor cantidad de agua en la mezcla, pero teniendo en cuenta que el mortero o el hormigón queden trabajables.

Como norma general se considera que el agua es adecuada para producir mortero u hormigón si su composición química indica que es apta para el consumo humano, sin importar si ha tenido un tratamiento preliminar o no; es decir, casi cualquier agua natural que pueda beberse y que no tenga sabor u olor notable sirve para mezclar el mortero o el concreto. Sin embargo, el agua que sirve para preparar estas mezclas, puede no servir para beberla.

El agua puede extraerse de fuentes naturales cuando no se tienen redes de acueducto y puede contener elementos orgánicos indeseables o un alto contenido inaceptable de sales inorgánicas. Las aguas superficiales en particular, a menudo contienen materia en suspensión tales como: aceite, arcilla, sedimentos, hojas y otros desechos vegetales; lo cual puede hacerla inadecuada para emplearla sin tratamiento físico preliminar, como filtración o sedimentación para permitir que dicha materia en suspensión se elimine.

2.7. IMPUREZAS ORGÁNICAS.

Las sustancias orgánicas contenidas en aguas naturales, afectan considerablemente el tiempo de fraguado inicial del cemento y la resistencia última del hormigón. Las aguas que tengan un color oscuro, un olor pronunciado, o aquellas en las cuales sean visibles lamas de algas en formación de color verde o café, deben ensayarse. Se debe tener especial cuidado con los altos contenidos de azúcar en el agua porque pueden ocasionar retardo en el fraguado.

2.8. IMPUREZAS INORGÁNICAS

Los límites permisibles para contenidos inorgánicos son algo amplios, pero en algunas partes, éstos pueden presentarse en cantidades suficientes para causar un deterioro gradual del hormigón. La información disponible respecto al efecto de los sólidos disueltos en la resistencia y durabilidad del hormigón es insuficiente para poder establecer unos límites numéricos con base en un sistema comprensible, pero se puede proporcionar una guía sobre niveles permisibles de ciertas impurezas. Los mayores iones que se presentan usualmente en aguas naturales son calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, y menos frecuente carbonato. Las aguas que contengan un total combinado de estos iones comunes que no sea mayor de 2 g/l (2000ppm), son generalmente adecuadas como agua de mezcla. La presencia de cloruros en el hormigón, ya sea que provengan del agua de mezcla, o de otras fuentes, puede presentar problemas potenciales con algunos cementos (generalmente con cantidades apreciables de aluminato tricálcico - C3A) o cuando se tienen metales embebidos en el hormigón. La cantidad de cloruros que pueden permitirse en el agua de mezcla, depende de la cantidad total de cloruros en el hormigón considerando las demás fuentes. Como una guía, el contenido total de cloruros del agua no debe exceder generalmente de 0,5 g/l. Algunas veces es necesario aceptar concentraciones más altas, como en ciertas regiones áridas donde las aguas naturales son bastante salinas.

El agua de mar se ha empleado para producir hormigón de cemento Portland, pero existe una tendencia para que esta cause humedad superficial y eflorescencia (formación de depósitos salinos en la superficie del mortero o del concreto). Su uso puede causar también una moderada reducción de la resistencia. El agua de mar no debe emplearse en hormigón reforzado o pre esforzado.

Una guía general a la aceptabilidad de los sulfatos en el agua de mezcla, es que el contenido de sulfatos no exceda 1 g de SO^3 /l. Sin embargo, se ha empleado satisfactoriamente agua con un contenido de sulfatos más alto. La cantidad de sulfatos, permitida en agua de mezcla, depende del contenido de sulfatos de los agregados y el cemento, ya que el factor crítico es la cantidad total de sulfatos en el hormigón.

El agua que contiene carbonatos y bicarbonatos de álcalis puede afectar el tiempo de fraguado del cemento y la resistencia del hormigón. Su presencia puede ser perjudicial si existe un riesgo de reacción álcalis-agregado. En general, su total combinado no debe exceder 1 g/l de agua.

2.9. CONTAMINACIÓN POR DESECHOS INDUSTRIALES

Se debe tener cuidado cuando se empleen aguas que pueden estar contaminadas por afluentes industriales o por drenaje de minas y depósitos de minerales entre otros; estas aguas deben ensayarse tal como se indica más adelante.

REQUISITOS

Como una guía, de ser posible realizar un análisis químico, se recomienda que el agua utilizada en la preparación de mezclas de mortero o concreto. Sin embargo, es preferible ensayar el agua que se va a emplear en la preparación de la mezcla y comparar los resultados con los de un agua testigo (de comportamiento conocido como por ejemplo agua destilada) (Instituto del Concreto, 1997) .

Tabla 6: Impurezas en el agua para mezclado

TIPO DE IMPUREZA	VALOR MÁXIMO RECOMENDADO
Ácidos orgánicos (ácido sulfúrico)	10000 ppm
Aceite mineral (por masa de cemento)	2 %
Agua con algas	no recomendable
Agua de mar:	
*para concreto no reforzado	35000 ppm
*para concreto reforzado o pretensado	no recomendable
Aguas sanitarias	20 ppm
Azúcar	500 ppm
Carbonato de calcio y magnesio	400 ppm
Carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio	1000 ppm
Cloruro de calcio	30000 ppm
Cloruro de magnesio	40000 ppm
Cloruros:	
*estructuras con bajo potencial de corrosión y condiciones secas	20000 ppm
*concreto pretensado	500 ppm
*estruct. con elementos galvaniz. y de aluminio	1000 ppm
Hidróxido de potasio (por masa de cemento)	1,2%
Hidróxido de sodio (por masa de cemento)	0,5%
Partículas en suspensión	2000 ppm
PH	6 - 8
Sales de hierro	40000 ppm
Sales de magnesio, estaño, zinc, cobre y plomo	500 ppm
Sulfato de magnesio	25000 ppm
Sulfato de sodio	1000 ppm
Sulfito de sodio	100 ppm

El contenido máximo de iones combinados de calcio, magnesio ,sodio, potasio, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato y carbonato es 20000ppm

2.10. CONCRETO

En general, el concreto puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento Portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.

El principal componente del concreto, es el cemento Portland, el cual ocupa entre el 7% y el 15% del volumen de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y cohesión que proveen buena resistencia a la compresión. El cemento Portland es producido por el hombre y proviene de la calcinación de rocas calizas y arcilla. El segundo componente, los agregados, ocupan entre el 60% y el 75% del volumen de la mezcla. Son esencialmente materiales inertes, naturales o artificiales, de forma granular, que por conveniencia han sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). En general, provienen de las rocas naturales, pero también existen agregados artificiales. El tercer componente, el agua, ocupa entre el 14% y el 18% del volumen de la mezcla e hidrata al cemento Portland por medio de complejas reacciones químicas.

Adicionalmente, el concreto también contiene alguna cantidad de aire atrapado accidentalmente (usualmente entre 1% y 3% del volumen de la mezcla), y puede contener aire incluido intencionalmente (entre 1% y 7% del volumen de la mezcla) lo cual se logra con el uso de aditivos o con cementos que tengan agentes inclusores de aire. Finalmente, con alguna frecuencia se añaden aditivos a la mezcla con el objeto de modificar una o más propiedades del concreto tales como acelerar o, retardar el fraguado, mejorar la trabajabilidad, reducir requerimientos de agua, incrementar resistencia, o alterar otras propiedades.

2.10.1. Ventajas y desventajas del concreto

Gambhir (2004) señala las siguientes ventajas y desventajas de la utilización del concreto hidráulico:

Ventajas:

- Es económico a largo plazo comparado con otros materiales utilizados en la construcción. Pueden ser utilizados agregados pétreos que se encuentren en la zona.
- El concreto posee una alta resistencia a la compresión. Los efectos causados por la corrosión y el intemperismo son mínimos. Si se elabora de manera adecuada, su resistencia llega a ser igual a la de una roca natural.
- El concreto fresco es relativamente fácil de manejar y moldear, además adopta prácticamente cualquier forma de acuerdo a las especificaciones. La cimbra que se utiliza para darle forma a las estructuras de concreto se puede reutilizar varias veces, por lo que resulta económico su uso.
- Tiene aplicaciones estructurales ilimitadas en combinación con el acero de refuerzo. El concreto y el acero tienen aproximadamente el mismo coeficiente de expansión térmica.
- El concreto puede ser rociado o utilizado como relleno en grietas finas para procesos de reparación.
- Es durable, resistente al fuego y requiere de menor mantenimiento.

Desventajas:

- El concreto tiene una baja resistencia a la tensión, y por lo tanto puede llegar a presentar grietas fácilmente. Por lo que se refuerza con varillas de acero, mallas o fibras.
- El concreto fresco se contrae con el secado, mientras que el concreto endurecido se expande con la humedad.

- El concreto se expande y se contrae con los cambios de temperatura. Esta expansión propicia la utilización de juntas de expansión, las cuales evitan la formación de grietas ocasionadas por el movimiento térmico.
- El concreto no es completamente impermeable a la humedad y los contenidos de solubles de sales, las cuales pueden causar eflorescencia.
- El concreto está expuesto a la desintegración por ataques de sulfatos y álcali.
- La falta de ductilidad inherente del concreto es una desventaja con respecto al diseño de resistencia sísmica.

2.10.2. Relación agua/cemento

La relación agua/cemento (a/c) es el cociente que resulta de relacionar la masa de agua, necesaria para la elaboración de una mezcla de concreto, entre la masa de cemento que ésta misma requiere. Es claro entonces que la relación a/c aumenta con el incremento de la masa del agua, y disminuye con el incremento de la masa del cemento. (Neville, Tecnología del concreto, 1999) señala que cuando un concreto está completamente compactado, su resistencia es inversamente proporcional a la relación agua/cemento, en base a los estudios realizados por Duff Abrams en 1919. Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua/cemento se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión.

A continuación, en la tabla 7, se presenta la dependencia entre la relación agua/cemento y la relación a la compresión del concreto que propone el ACI (American Concrete Institute) en su criterio del diseño de mezclas.

Tabla 7: Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto, ACI.

Relación agua/cemento por masa		
Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm^2	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

2.10.3. Durabilidad

(Kosmatka H. , 2004) define a la durabilidad del concreto como la habilidad que tiene éste para resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. (Kumar & Monteiro, 1998) añaden que un concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente.

A excepción del daño mecánico que sufre el concreto, los problemas de durabilidad que más efecto tienen en él son aquellos que se producen por el transporte de fluidos a través de éste. (Neville, Tecnología del concreto, 1999) menciona que hay tres fluidos principalmente importantes que pueden entrar en el concreto: el agua, pura o que lleve iones agresivos, dióxido de carbono y oxígeno. A la facilidad con la cual los fluidos, tanto líquidos como gases, pueden entrar en el concreto y moverse a través de él se le llama comúnmente permeabilidad.

La permeabilidad total del concreto al agua está función de: la permeabilidad de la pasta; la permeabilidad y la granulometría del agregado; la calidad de la pasta y de la zona de transición del agregado y la proporción relativa de pasta y agregado. Un concreto de baja permeabilidad requiere una relación agua-cemento baja y un periodo de curado adecuado (Kosmatka H. , 2004). Una alta permeabilidad está ligada a la presencia de poros interconectados, por los cuales se permite el flujo de líquidos a través del concreto. El deterioro del concreto puede presentarse por:

- Reactividad álcali-agregado
- Carbonatación
- Resistencia a los cloruros y corrosión de la armadura
- Resistencia química
- Sulfatos y cristalización de sales
- Exposición al agua de mar

La reactividad álcali-agregado se presenta cuando los minerales activos de los agregados reaccionan con los hidróxidos de los álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa sólo cuando produce expansión considerable.

La carbonatación ocurre cuando el dióxido de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, tales como los hidróxidos de calcio para formar carbonatos. Cuando reacciona con hidróxido de calcio hay formación de carbonato de calcio. La alcalinidad del concreto. El ph del concreto es normalmente de 12 o 13, con esta alcalinidad el acero no se oxida (Medina, 2007). Es por ello que es importante que la carbonatación sea mínima, además de tener un recubrimiento adecuado del acero de refuerzo, con lo cual se garantiza que la profundidad de la carbonatación tenga poca importancia.

La resistencia a los cloruros y corrosión se ve afectada cuando los iones cloruro, presentes en los anticongelantes o en el agua de mar, son capaces de destruir o penetrar en la película de protección que se forma, por la alta alcalinidad del concreto, sobre el acero de refuerzo.

La resistencia química del concreto se ve mermada cuando el concreto está expuesto a ambientes agresivos, como la industria química y en las instalaciones de almacenamiento.

Sulfatos y cristalización de sales. Los sulfatos (sulfato de calcio, sulfato de y sulfato de magnesio) reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada, lo que provoca presiones que llegan a romper la pasta de cemento, lo que ocasiona la desintegración del concreto.

El concreto, al tener poros en su estructura, es susceptible al ataque causado por cristalización de sales, las cuales pueden tener o no sulfatos y pueden o no reaccionar con los compuestos hidratados en el concreto. El carbonato de calcio y sulfato de sodio son algunas de las sales que causan el deterioro del concreto. El daño ocurre cuando las soluciones saturadas de estas sales se secan, ascienden a la superficie por acción de los capilares, la fase de solución se vuelve súper saturada y la cristalización ocurre.

Los concretos expuestos al ambiente marino deben ser diseñados de manera especial, esto debido a los ciclos repetidos de mojado y secado y/o congelamiento y deshielo. Además, los concretos expuestos a este ambiente requieren presentar una baja permeabilidad, esto debido a la presencia de sulfatos y cloruros en el agua de mar, para con ello minimizar la corrosión del acero de refuerzo y el ataque por sulfatos.

2.10.4. Trabajabilidad

La trabajabilidad del concreto se define como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cierta cantidad de mezcla de concreto fresco con una pérdida mínima de homogeneidad. El término manipular incluye las operaciones en la edad temprana de colocación, compactación y acabado (Kumar & Monteiro, 1998).

Mencionan que la trabajabilidad es una propiedad compuesta, de por lo menos dos componentes principales:

- La consistencia, que describe la facilidad de fluir.
- La cohesividad, que describe la tendencia a sangrar o a segregar.

(Neville & Brooks, Concrete Technology, 2010) mencionan que la resistencia del concreto se ve afectada de manera negativa por la presencia de vacíos en la masa compactada, y que para que éstos sean menores, se requiere suficiente manejabilidad para que sea posible una compactación virtualmente total, empleando una cantidad razonable de trabajo en ciertas condiciones.

2.10.5. Revenimiento

La norma (NMX-C-156-ONNCCE, 2010) define al revenimiento como una medida de la consistencia del concreto fresco en términos de la disminución de altura. En una mezcla, entre mayor sea el revenimiento, más húmeda es ésta.

(Neville, Tecnología del concreto, 1999) menciona que el revenimiento es muy útil en la obra ya que se puede utilizar como verificador de la variación de mezcla a mezcla o de hora a hora de los materiales que se están alimentando en la mezcladora.

2.11. PRUEBAS DESTRUCTIVAS

2.11.1. Compresión simple

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se puede diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad, que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura.

La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide tronando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayos de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste a la carga y se reporta en megapascuales (MPa) en unidades SI.

Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 17 MPa para concreto residencial hasta 28 MPa y más para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 170 MPa y más.

¿Por qué se determina la resistencia a la compresión?

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada, f'_c , del proyecto.

Los resultados de las pruebas de resistencia a partir de cilindros moldeados se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras, para programar las operaciones de construcción, tales como remoción de cimbras o para evaluar la conveniencia de curado y protección suministrada a la estructura.

Los cilindros sometidos a ensayo de aceptación y control de calidad se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en probetas curadas de manera estándar según la ASTM (ASTM-C-192M, 2018) “Práctica estándar para elaborar y curar cilindros de ensayo de concreto en campo”.

Para estimar la resistencia del concreto in situ, la ASTM formula procedimientos para las pruebas de curado en campo. Las probetas cilíndricas se someten a ensayo de acuerdo a (ASTM-C-39M, 2018) “Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto”.

Un resultado de prueba es el promedio de, por lo menos, dos pruebas de resistencia curadas de manera estándar o convencional elaboradas con la misma muestra de concreto y sometidas a ensayo a la misma edad. En la mayoría de los casos, los requerimientos de resistencia para el concreto se realizan a la edad de 28 días.

Al diseñar una estructura los ingenieros se valen de la resistencia especificada, f'_c , y especifican el concreto que cumpla con el requerimiento de resistencia estipulado en los documentos del contrato del proyecto. La mezcla de concreto se diseña para producir una

resistencia promedio superior a la resistencia especificada de manera tal que se pueda minimizar el riesgo de no cumplir la especificación de resistencia. Para cumplir con los requerimientos de resistencia de una especificación de proyecto se aplican los siguientes dos criterios de aceptación:

El promedio de tres ensayos consecutivos es igual o supera a la resistencia especificada, $f'c$.

Ninguno de los ensayos de resistencia deberá arrojar un resultado inferior a $f'c$ en más de 3.45 MPa, ni ser superior en más de $0.10 f'c$, cuando $f'c$ sea mayor de 35 MPa.

Resulta importante comprender que una prueba individual que caiga por debajo de $f'c$ no necesariamente constituye un fracaso en el cumplimiento de los requerimientos del trabajo.

Cuando el promedio de las pruebas de resistencia de un trabajo caiga dentro de la resistencia promedio exigida, $f'c$, la probabilidad de que las pruebas de resistencia individual sean inferiores a la resistencia especificada es de aproximadamente 10% y ello se tiene en cuenta en los criterios de aceptación.

Cuando los resultados de las pruebas de resistencia indican que el concreto suministrado no cumple con los requerimientos de la especificación es importante reconocer que la falla puede radicar en las pruebas, y no en el concreto. Ello es particularmente cierto si la fabricación, manejo, curado y pruebas de los cilindros no se realizan en conformidad con los procedimientos estándar. Ver “Baja resistencia de cilindros de concreto”, revista CyT, marzo 2006.

Los registros históricos de las pruebas de resistencia se utilizan para establecer la resistencia promedio deseada de mezcla de concretos para obras futuras.

Cómo realizar la prueba de resistencia del concreto

Los cilindros para pruebas de aceptación deben tener un tamaño de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm) o 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm), cuando así se especifique. Las probetas más pequeñas tienden a ser más fáciles de elaborar y manipular en campo y en laboratorio. El

diámetro del cilindro utilizado debe ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee en el concreto.

El registro de la masa de la probeta antes de cabecearla constituye una valiosa información en caso de desacuerdos.

Con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente los cilindros se cabecean con mortero de azufre (ASTM Test Designation C-617, 2003) o con almohadillas de neopreno (ASTM Test Designation C-1231, 2001). El cabeceo de azufre se debe aplicar como mínimo dos horas antes y preferiblemente un día antes de la prueba.

Las almohadillas de neopreno se pueden usar para medir las resistencias del concreto entre 10 a 50 MPa. Para resistencias mayores de hasta 84 Mpa se permite el uso de las almohadillas de neopreno siempre y cuando hayan sido calificadas por pruebas con cilindros compañeros con cabeceo de azufre. Los requerimientos de dureza en durómetro para las almohadillas de neopreno varían desde 50 a 70 dependiendo del nivel de resistencia sometido a ensaye. Las almohadillas se deben sustituir si presentan desgaste excesivo.

No se debe permitir que los cilindros se sequen antes de la prueba.

El diámetro del cilindro se debe medir en dos sitios en ángulos rectos entre sí a media altura de la probeta y deben promediarse para calcular el área de la sección. Si los dos diámetros medidos difieren en más de 2%, no se debe someter a prueba el cilindro.

Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro en más 0.5% y los extremos deben hallarse planos dentro de un margen de 0.002 pulgadas (0.05 mm).

Los cilindros se deben centrar en la máquina de ensayo de compresión y cargados hasta completar la ruptura. El régimen de carga con máquina hidráulica se debe mantener en un rango de 0.15 a 0.35 MPa/s durante la última mitad de la fase de carga. Se debe anotar el tipo de ruptura. La fractura cónica es un patrón común de ruptura.

La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección. (ASTM Test Designation C-39, 2003) presenta los factores de corrección en caso de que la razón longitud diámetro del cilindro se halle entre 1.75 y 1.00, lo cual es poco común. Se someten a prueba por lo menos dos cilindros de la misma edad y se reporta la resistencia promedio como el resultado de la prueba, al intervalo más próximo de 0.1 MPa.

El técnico que efectúe la prueba debe anotar la fecha en que se recibieron las probetas en el laboratorio, la fecha de la prueba, la identificación de la probeta, el diámetro del cilindro, la edad de los cilindros de prueba, la máxima carga aplicada, el tipo de fractura y todo defecto que presenten los cilindros o su cabeceo. Si se mide, la masa de los cilindros también deberá quedar registrada.

La mayoría de las desviaciones con respecto a los procedimientos estándar para elaborar, curar y realizar el ensaye de las probetas de concreto resultan en una menor resistencia medida.

El rango entre los cilindros compañeros del mismo conjunto y probados a la misma edad deberá ser en promedio de aproximadamente. 2 a 3% de la resistencia promedio. Si la diferencia entre los dos cilindros compañeros sobrepasa con demasiada frecuencia 8%, o 9.5% para tres cilindros compañeros, se deberán evaluar y rectificar los procedimientos de ensaye en el laboratorio.

Los resultados de las pruebas realizadas en diferentes laboratorios para la misma muestra de concreto no deberán diferir en más de 13% aproximadamente del promedio de los dos resultados de las pruebas (West Conshohocken).



Ilustración 2.11.1-1 Carga a compresión de un cilindro de concreto.



Ilustración 2.11.1-2 Cilindros de concretos cabeceados listos para probar a compresión.



Ilustración 2.11.1-3 Cilindro fracturado por carga axial en sus extremos.

2.11.2. Módulo de elasticidad

Elasticidad

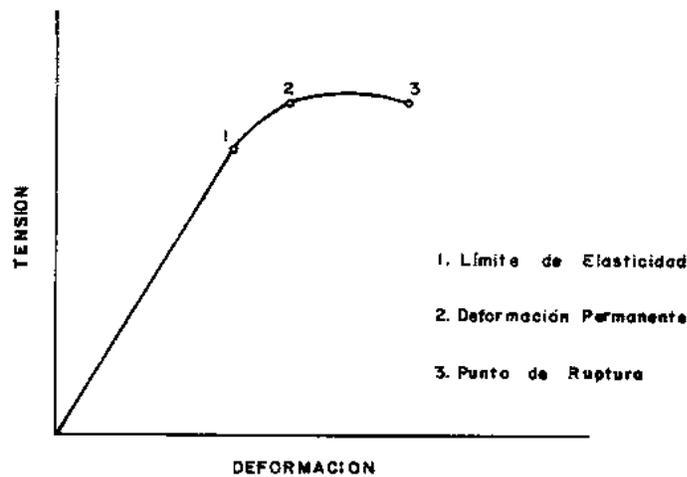
La elasticidad es la propiedad mecánica que hace que los materiales sufran deformaciones reversibles por la acción de las fuerzas exteriores que actúan sobre ellos. La deformación es la variación de forma y dimensión de un cuerpo. Un material es elástico cuando la deformación que sufre ante la acción de una fuerza, cesa al desaparecer la misma.

Los materiales totalmente elásticos pueden llegar hasta cierta deformación máxima, es lo que se conoce como límite elástico. Si se sobrepasa este límite, la deformación del material es permanente y sus propiedades cambian. Si el esfuerzo que incide sobre el material supera las fuerzas internas de cohesión, el material se fisura y termina por fallar.

Observa

2.11.2-1

material.



en la ilustración los estados de deformación de un

Ilustración 2.11.2-1 Curva esfuerzo deformación típica de los materiales

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de un material es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria. Representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo.

Cuando la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria a que está sometido el material es lineal, constante y los esfuerzos aplicados no alcanzan el límite de proporcionalidad, el material tiene un comportamiento elástico que cumple con la Ley de Hooke.

Módulo de elasticidad estática del concreto

El módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo. El ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático del concreto y tiene como principio la aplicación de carga estática y de la correspondiente deformación unitaria producida.

La primera fase es la zona elástica, donde el esfuerzo y la deformación unitaria pueden extenderse aproximadamente entre 0% al 40% y 45% de la resistencia a la compresión del concreto.

Una segunda fase, representa una línea curva como consecuencia de una microfisuración que se produce en el concreto al recibir una carga, estas fisuras se ubican en la interfase agregado- pasta y está comprendida entre el 45% y 98% de la resistencia del concreto.

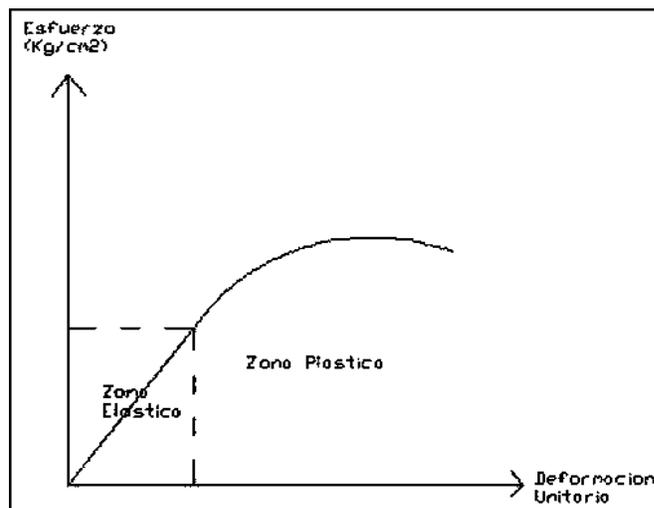


Ilustración 2.11.2-2. Zona elástica y plástica en la curva esfuerzo deformación

Diagrama de esfuerzo deformación

¿Por qué es importante conocer el módulo de elasticidad del concreto?

1. Uno de los valores más importantes en el diseño de concreto reforzado es el módulo de elasticidad, puesto que este influye en las deflexiones y rigidez de una estructura.
2. El módulo de elasticidad del concreto está determinado por una estrecha relación que existe entre el esfuerzo que experimenta un material y la correspondiente deformación unitaria. Es un valor muy importante para el análisis estructural.
3. Tener un buen conocimiento del módulo de elasticidad del concreto bajo condiciones de carga lenta podría emplearse en futuras investigaciones acerca del módulo de elasticidad dinámico de concreto (es decir bajo cargas rápidas) lo anterior sería importante para conocer el comportamiento real del concreto bajo la acción de un sismo.
4. Con el dato del módulo de elasticidad podemos conocer el acortamiento por carga axial de un elemento estructural.
5. El uso masivo de concreto como principal material de construcción hacen indispensable conocer todas sus propiedades mecánicas para tener unos diseños acertados de los proyectos de construcción.
6. Un aspecto importante del análisis y diseño de estructuras se relaciona con las deformaciones que causan las cargas aplicadas a la estructura. Obviamente es importante evitar las deformaciones grandes que puedan impedir que la estructura cumpla con el propósito para el cual se concibió, pero el análisis de deformaciones puede ayudarnos también para el cálculo de los esfuerzos.

Procedimientos Preparación Especímenes cilíndricos moldeados

Durante el tiempo que transcurra entre el retiro de los especímenes del cuarto de curado y el ensaye, deben protegerse cubriéndolos con una jerga húmeda para evitar que pierda humedad, evitando a la vez cambios en la temperatura en el área de ensaye; en el caso de existir variaciones importantes estas deben anotarse. Una vez retirados los especímenes

del cuarto de curado, determinar su masa (Peso), medir y cabecear de acuerdo a lo indicado en la (NMX C-109, 2013).

Prueba

Efectuando lo anterior, se debe iniciar el ensaye de los especímenes en los que se determinará el módulo de elasticidad, procediendo de la forma siguiente para el caso de los dispositivos indicados, dos anillos y dos micrómetros, y dos anillos y un micrómetro, por esta norma, por ser el más empleado en nuestro medio. Cabe decir que hay que tomar lecturas de deformación y carga en tal cantidad que pueda definirse mediante interpolación, calculado o gráficamente, el esfuerzo (S_1), correspondiente a la deformación unitaria de 50 millonésima (e_1), así como la deformación unitaria (e_2), correspondiente al 40 % del esfuerzo máximo (S_2). Si se desea obtener la curva esfuerzo deformación, será conveniente tomar un mayor número de lecturas. No deberá interrumpirse la carga en la toma de cada lectura, para lo cual, normalmente es necesario contar cuando menos con 3 personas para la realización de la prueba. El procedimiento de ensaye es el siguiente:

- Colocar el espécimen en una superficie horizontal plana y firme, donde se le monte el dispositivo de medición. Debe tenerse la precaución de que, al colocar el dispositivo en el espécimen. éste quede exactamente al centro de los anillos, fijándolos firmemente mediante los anillos de punta, para evitar que existan deslizamientos.
- Es importante verificar que los micrómetros de deformación queden perfectamente verticales, paralelos al eje longitudinal del espécimen, asegurándose que el vástago del micrómetro tenga la carrera suficiente para la deformación que deba registrarse.
- Una vez ajustados los micrómetros, hay que retirar cuidadosamente las barras que separan los anillos, observando que los indicadores de los micrómetros no registren movimientos importantes. Si esto sucede será un indicativo de que los anillos no se fijaron adecuadamente, por lo habrá que desarmar y volver a montar el deformímetro o dispositivo de medición.

- Colocar el espécimen con el deformímetro sobre la platina de la prensa, centrándolo adecuadamente antes de proceder a la aplicación de la carga.
- Colocar la carátula de los micrómetros en 0,0 (Cero).
- Aplicar la primera precarga de 10 al 15 % del promedio de la resistencia de ruptura, obtenida en los especímenes compañeros ensayados a compresión, como se indica en “Número de especímenes”, de esta norma. Durante esta precarga verificar el correcto funcionamiento de los micrómetros del deformímetro.
- Aplicar una segunda precarga hasta el mismo nivel que la anterior, registrando cargas y deformaciones cada tonelada hasta 5, después se incrementa a cada 5 t. Al retirar la carga se observa si las agujas de los micrómetros regresaran a 0,0 (cero), y si la deformación leída en ellos es similar, si no es así, verificar el centrado y ajustar los micrómetros. Realizar otras precargas hasta lograrlo.
- Posteriormente, aplicar la carga de ensaye, registrando deformaciones cada tonelada hasta una carga de 5. Si la carátula de la prensa lo permite en las primeras 2 t, registrar las deformaciones cada 0,5 t, de no ser así, las lecturas deben registrarse cada tonelada hasta llegar a 5.

De 5 toneladas en adelante, las deformaciones deben registrarse cada 5 toneladas, hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo obtenido en los especímenes ensayados de acuerdo a la (NMX C-083, 2014). La velocidad de la carga en las primeras 5 t debe ser de 1 min, de ahí en adelante 20 s por cada 5 t. En el apéndice A, se proporciona un ejemplo de la forma de registro que podría emplearse en estas pruebas y una forma usual del reporte del módulo de elasticidad estático.

Una vez alcanzada la carga que representa el 60 % de la máxima obtenida en el ensaye a compresión, es importante reducir la velocidad de aplicación de la carga para permitir que se aflojen los tornillos que fijan los anillos y de ser posible, para evitar deterioro se retiran los micrómetros, después de lo cual se proseguirá con la aplicación de la carga a la

velocidad indicada en la (NMX C-083, 2014) hasta llegar a la carga máxima o falla del espécimen.

Si se desea determinar la relación de Poisson, deben registrarse la deformación transversal en los mismos puntos en que se registra la deformación longitudinal.

En el caso de corazones, el procedimiento a seguir es similar al escrito en los párrafos anteriores, excepto que las cargas aplicadas serán proporcionales al área transversal del espécimen (ASTM-C-469-02).

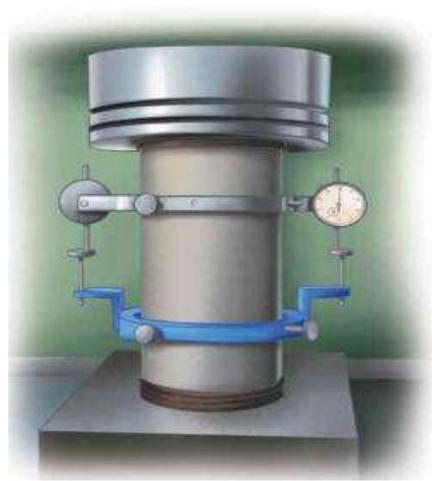


Ilustración 2.11.2-3 Cilindro con los anillos de micrómetros colocados alrededor de su eje para tomar lectura de deformación.

Cálculo

Calcular el módulo de elasticidad, con una precisión de 50 000psi (344.74MPa) de la siguiente manera:

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)} \quad \text{ECU. [1]}$$

Dónde:

E = Módulo de Elasticidad, psi

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga máxima

S_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal, ϵ_1 , de 50 millonésimas, psi, y

ϵ_2 = Deformación longitudinal producida por esfuerzo S_2

Calcular la relación de Poisson, con una precisión de 0.01, de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{(\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1})}{(\epsilon_2 - 0.000050)} \quad \text{ECU. [2]}$$

Dónde:

ν = Relación de Poisson

ϵ_{t2} = Deformación transversal a la altura media de la muestra producida por el esfuerzo S_2 , y

ϵ_{t1} = Deformación transversal a la altura media de la muestra producida por el esfuerzo S_1 .

2.12. PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

2.12.1. Resistividad eléctrica

Los primeros intentos de utilización de los métodos eléctricos datan desde Robert W. Fox en 1830, quien observó corrientes eléctricas fluyendo en las minas de cobre en Cornish, resultado de las reacciones químicas dentro de las vetas de los depósitos.

A principio de 1882, Carl Barus condujo experimentos en Comstock Lode, Nevada, que lo convencieron de que este método podía ser usado para la búsqueda de sulfato de oro oculto.

Fred H. Brown en la era de 1883 a 1891, Alfred Williams y Leo Daft en 1897, hicieron el primer intento en determinar la diferencia en la resistividad de la Tierra asociada con los

depósitos de oro, le fueron otorgadas patentes por esos métodos. La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos, donde la tierra es estimulada por una fuente controlada y son medidos los potenciales artificiales que resultan fue hecha por Schlumberger en 1912. En esa época él introdujo los métodos de líneas equipotenciales de corriente directa (Ward, 1980).

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915, por dos personas principalmente, Wenner en 1912 del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en 1920. Las técnicas de campo fueron desarrolladas por O. H. Gish y W. J. Rooney del Carnegie Institution of Washington y por Marcel Schlumberger, E. G. Leonardon, E. P. Poldini y H.g. Doll del grupo Schlumberger. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aún lleva su nombre), mientras que el grupo Schlumberger estandarizó una configuración en que los electrodos de potencial están muy pegados, y la medida de campo eléctrico es hecha en la mitad de la distancia de los electrodos de corriente (llamado arreglo Schlumberger) (Ward, 1980).

LEY DE OHM

La conductividad eléctrica es la facilidad con que puede moverse la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia. Ya que un electrón es una cantidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada Culombio (Q). Un culombio corresponde a 6.24 trillones de electrones (6.24×10^{18}). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (densidad (I)). El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones y por iones, el flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones (corriente eléctrica).

$$A = \frac{Q}{s} \quad \text{ECU. [3]}$$

Dónde:

$A = \text{Amperio}$, 1 Amperio = 1 Culombio/segundo

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (J), cuando 1 Q de electricidad se mueve de un punto al otro (Ávila & Genescá, 2003). La unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama voltio (V) y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 voltio cuando se realiza un trabajo de 1 J por cada culombio de electricidad que transita de un punto al otro, por tanto:

$$V = J/C \quad \text{ECU. [4]}$$

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en voltios y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda. Esta fem representa el trabajo total efectuado en julios por los culombios de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada. La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos (Ávila & Genescá, 2003). El conductor que siga esta relación obedece la ley de Ohm expresada como:

$$V = RI \quad \text{ECU. [5]}$$

Dónde R es la resistencia o habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor tiene baja resistencia y un mal conductor tiene alta resistencia. Un ohmio se define como la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio en sus extremos y una corriente de 1 A fluye por él.

$$\Omega = V/A \quad \text{ECU. [6]}$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero por ejemplo en el carbón la resistencia baja con esta. La resistencia al flujo de corriente es mínima cuando:

1. El medio presenta baja resistividad (alta conductividad)
2. Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
3. Se tiene un área transversal grande para el flujo de corriente

En cambio, la resistencia al flujo de corriente es máxima cuando:

1. El medio presenta alta resistividad (baja conductividad)
2. Las distancias son grandes para el flujo de corriente
3. El área transversal es pequeña para el flujo de corriente

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, Martínez Molina, Lomelí González, & Pérez Gallardo, 2010).

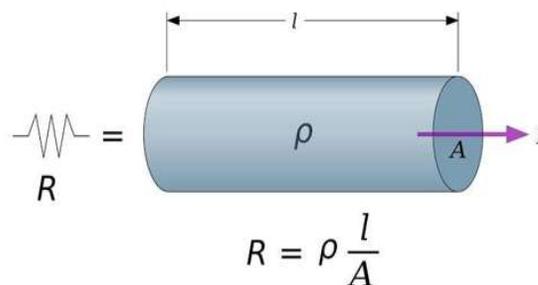


Ilustración 2.12.1-1. Esquema de la prueba de resistividad eléctrica

2.12.2. Velocidad de pulso ultrasónico

Muchas naciones han desarrollado procedimientos normalizados para medir la velocidad de pulso. En Estados Unidos, el comité C09 de la ASTM inicio el desarrollo de una norma para la velocidad de pulso a finales de 1960. Una norma tentativa se emitió en 1968. En 1971 se emitió una norma para el método y no se han hecho cambios significativos desde entonces (ASTM C-597, 2016). El significado y el uso del método de prueba, está dado en la norma ASTM C 597-16, de la siguiente manera:

La velocidad de pulso V , de una onda longitudinal de compresión en una masa de concreto está relacionada con sus propiedades elásticas y su densidad de acuerdo a la siguiente relación:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \text{ECU. [7]}$$

Dónde:

V = Velocidad de pulso ultrasónico

E = Módulo de elasticidad dinámico

μ = Relación dinámica de Poisson

ρ = Densidad

Este método de prueba es aplicado para evaluar la uniformidad y calidad relativa del concreto, al indicar la presencia de vacíos y grietas, y para evaluar la eficacia de la reparación de las grietas. También es aplicado para indicar cambios en las propiedades del concreto, y en el estudio de estructuras, para estimar la gravedad de la deterioración o agrietamiento. Cuando se usa para monitorear cambios en su condición con el tiempo, se marcan en la estructura ubicaciones de prueba para garantizar que las pruebas se repitan en las mismas posiciones.

El grado de saturación del concreto afecta la velocidad de pulso, y este factor debe ser considerado en la evaluación de los resultados de prueba. Además, la velocidad de pulso en concreto saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

Nota 1: la velocidad de pulso de concreto saturado puede ser hasta un 5% mayor que en concreto seco.

La velocidad de pulso es independiente de las dimensiones siempre que las ondas reflejadas no compliquen la determinación del tiempo de llegada de la transmisión directa del pulso.

Nota 2: Un acoplamiento adecuado puede ser verificado por inspección de la onda y la magnitud de la forma de onda de llegada. La forma de onda debe tener una forma decadente sinusoidal. La forma puede ser revisada mediante las salidas de un osciloscopio o con una pantalla digital inherente en el dispositivo.

Los resultados obtenidos por el uso de este método no son considerados como un medio para medir el esfuerzo ni como una prueba adecuada para establecer el cumplimiento del Módulo de Elasticidad de concreto en campo con el que se asumió en el diseño. El método de resonancia longitudinal es el método recomendado para determinar el Módulo de Elasticidad dinámico de especímenes de prueba obtenidos de concreto en campo debido a que la relación de Poisson no tiene que ser conocida.

Nota 3: Cuando las circunstancias lo permitan, puede establecerse una relación velocidad-esfuerzo (o velocidad-módulo) a partir de la determinación de la velocidad de pulso y resistencia a la compresión (o Módulo de Elasticidad) de un número de especímenes de concreto. Esta relación puede servir como una base para la estimación de la resistencia (o Módulo de Elasticidad) por más pruebas de velocidad de pulso en ese concreto.

El procedimiento es aplicable en campo y en pruebas de laboratorio sin tener en cuenta la forma o tamaño del espécimen dentro de las limitaciones de las fuentes disponibles de generación de pulso.

Ya que la velocidad de pulso en el acero puede ser de 1.4 a 1.7 veces que la velocidad de pulso en el concreto, las mediciones de la velocidad de pulso en las proximidades del acero serán mayores que en concreto simple de la misma composición. Cuando sea posible se deben evitar las mediciones cerca del acero paralelo a la dirección de propagación del pulso (ASTM C-597, 2016).

2.12.2.1. Aplicaciones del método de velocidad de pulso.

El método de velocidad de pulso ha sido aplicado exitosamente tanto en campo como en laboratorio (Malhorta & Carino, 2004). Además, puede ser usado para el control de calidad, así como para el análisis de deterioro. La figura siguiente ilustra la aplicación del método de velocidad de pulso para una muestra de concreto.

El instrumento de prueba consiste de un medio para producir un pulso de onda en el concreto (generador y transmisor de pulso) y un medio de sensibilidad de llegada de pulso (receptor) y medir con precisión el tiempo tomado por el pulso que viaja a través del concreto. El equipo puede ser conectado a un osciloscopio o a otro dispositivo de pantalla, para observar la naturaleza del pulso recibido (West Conshohocken). Se tienen equipos portátiles de prueba de velocidad de pulso ultrasónico, los cuales son simples de operar, además pueden incluir baterías recargables o una unidad de carga. Típicamente, los tiempos de pulso son de hasta 6500 μ s y pueden ser medidos con una resolución de 0.1 μ s. La medición del tiempo de viaje es promediada. El instrumento cuenta con 2 transductores, uno para recibir y uno para transmitir el pulso ultrasónico. Estos transductores tienen frecuencias de 25 a 100kHz y son los usados para realizar pruebas en el concreto. Se tienen también transductores con diferentes frecuencias de resonancia para aplicaciones especiales: transductores de alta frecuencia (arriba de 100kHz) son usados para muestras pequeñas, trayectorias relativamente cortas, o concreto de alta resistencia, mientras que los transductores de bajas frecuencias (por debajo de 25kHz) son

usados para especímenes grandes y trayectorias relativamente grandes, concreto con tamaño de agregado grande. Estos transductores principalmente generan ondas de compresión en una frecuencia predominante, con la mayor parte de la energía de onda dirigida a lo largo del eje normal a la cara del transductor.

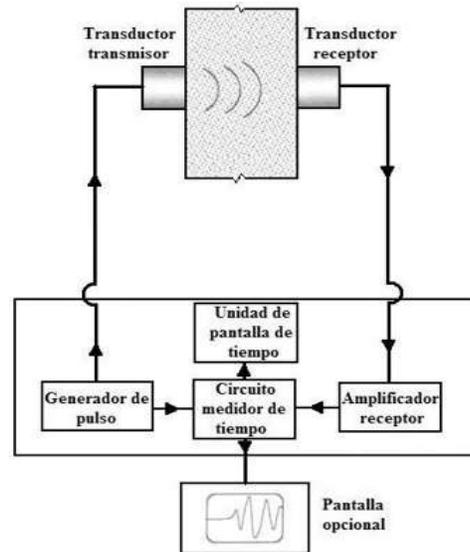


Ilustración 2.12.2.1-1. Esquema de la prueba de velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico es una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto, la cual se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio (Malhorta & Carino, 2004).

Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante y ondas superficiales o Rayleigh. La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio, de tal manera que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, mismas que se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material.

La idea básica del método de velocidad de pulso es establecer que la velocidad de un pulso de onda de compresión a través de un medio depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio.

El transductor transmisor del instrumento de velocidad de pulso transmite una onda en el concreto y el transductor receptor, a una distancia L , recibe el pulso que pasa por el concreto en otro punto. La pantalla del instrumento de velocidad de pulso indica el tiempo de tránsito, Δt , que toma el pulso de la onda de compresión en viajar a través del concreto. La velocidad del pulso de la onda de compresión V , por lo tanto, es:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad \text{ECU. [8]}$$

El pulso de compresión transmitido a través del concreto se somete a dispersión en los límites de los agregados. Para cuando el pulso llega al transductor receptor, este se transforma en una onda compleja, que contiene múltiples ondas de compresión y de cortante reflejadas. Desde luego, las ondas de compresión viajan más rápido y llegan primero al receptor.

Para transmitir o recibir el pulso, los transductores deben estar en completo contacto con el objeto de prueba; de otro modo el aire entre el objeto de prueba y el transductor puede introducir un error en el tiempo de tránsito indicado. Este error es introducido por que sólo una insignificante cantidad de energía de onda puede ser transmitida a través del aire. Se pueden usar muchos acopladores del mercado para eliminar el aire y asegurar un buen contacto entre la muestra y los transductores. Tenemos acopladores como grasas, jabón, pasta de caolín-glicerol. Las capas del acoplador deben de ser tan delgadas como sea posible. Aplicando una presión constante en los transductores, se podrán tomar lecturas repetidas en una ubicación hasta obtener un mínimo valor de tiempo de tránsito. Si la superficie del concreto está muy rugosa, se debe usar grasa espesa como acoplador. En algunos casos, que se tenga que suavizar la superficie rugosa o establecer una

superficie lisa se puede hacer con el uso de yeso, o con una pasta de cemento de fraguado rápido o con un mortero epóxico de fraguado rápido. La nivelación de la pasta debe realizarse antes de la prueba de velocidad de pulso. En superficies muy rugosas, también puede emplearse un receptor exponencial con un diámetro de punta de sólo 6mm, como, por ejemplo, superficies de mortero dañadas por fuego o por la acción de la intemperie. Sin embargo, hay que destacar que esta prueba es buena sólo para recibir la señal. Se requiere una superficie lisa para el transductor transmisor (Malhorta & Carino, 2004).

La velocidad de pulso para un concreto ordinario es típicamente de 3700 a 4200m/s. Por tanto, para un trayecto de 300mm el tiempo de viaje es aproximadamente de 70 a 85 μ s. Es obvio que el instrumento debe ser muy exacto para mediciones con pequeños tiempos de tránsito. La trayectoria debe ser medida también con cuidado. Debido a que el método de velocidad de pulso es una técnica de propagación de onda, debe ser eliminada cualquier fuente (como por ejemplo martillos neumáticos) del menor movimiento de onda durante la prueba.

Existen tres configuraciones en las cuales se pueden arreglar o acomodar los transductores. Tenemos entonces, 1) transmisión directa; 2) transmisión semidirecta; y 3) transmisión indirecta o método de superficie. El método de transmisión directa, es el más deseable y el arreglo más satisfactorio, debido a que, con este arreglo, se transmite y recibe el máximo de la energía del pulso. El método de transmisión semidirecta, puede ser usado satisfactoriamente también. Sin embargo, se debe tener cuidado de que los transductores no estén muy alejados; de otro modo la transmisión del pulso podría disminuir y por tanto la señal podría no detectarse. Este método es usado donde se tienen concentraciones de refuerzos. El método de transmisión indirecta o método de superficie, es el menos satisfactorio por que la amplitud de la señal que se recibe es significativamente menor que la señal que se recibe por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores y se requiere un procedimiento especial para determinar la velocidad de pulso (Qixian & Bungey, 1996).

El procedimiento para el método indirecto consiste en: Primero, la localización del transductor transmisor se fija y la localización del receptor se cambia en incrementos fijos a lo largo de una línea, y se toma una serie de lecturas de tiempo. La distancia directa entre los dos transductores se traza en el eje de las “x” y el correspondiente tiempo de tránsito del pulso se traza en el eje “y”. La inversa de la pendiente de este gráfico es la velocidad de pulso a lo largo de la línea.

Cuando se usa este método de superficie, el pulso se propaga en la capa de concreto cercana a la superficie. La proximidad de la superficie del concreto en ocasiones está compuesta ligeramente diferente al concreto en las capas inferiores. Por ejemplo, el concreto cercano a la superficie de una losa tiene mayores cantidades de material fino que el concreto de las porciones interiores de la losa. Entonces, las mediciones de velocidades por el método de superficie son típicamente menores que las transmisiones tomadas con el método de transmisión directa. Este comportamiento, sin embargo, puede convertirse en un medio para detectar y estimar el espesor de una capa de calidad diferente del material. Una capa de concreto de menor calidad puede darse debido a prácticas inapropiadas de construcción (como por ejemplo una vibración y terminado pobre, un curado pobre, juntas frías debido a retrasos en la construcción, una colocación incorrecta), daños debidos a la acción del desgaste (por ejemplo, congelación y deshielo, ataque de sulfatos, y corrosión del acero de refuerzo) y el daño por el fuego. Los espesores de las capas pueden ser determinados mediante el procedimiento indirecto o de superficie. Cuando los dos transductores están cercanos, el camino más rápido es viajar por la capa superior del concreto, y como los transductores se apartan más, el camino de viaje más rápido es la ruta combinada a través de ambas capas. La velocidad de pulso a través de la capa superior (V_1) y la de la capa inferior (V_2) será indicada en la gráfica por las diferentes pendientes de las dos líneas rectas ajustadas a los datos.

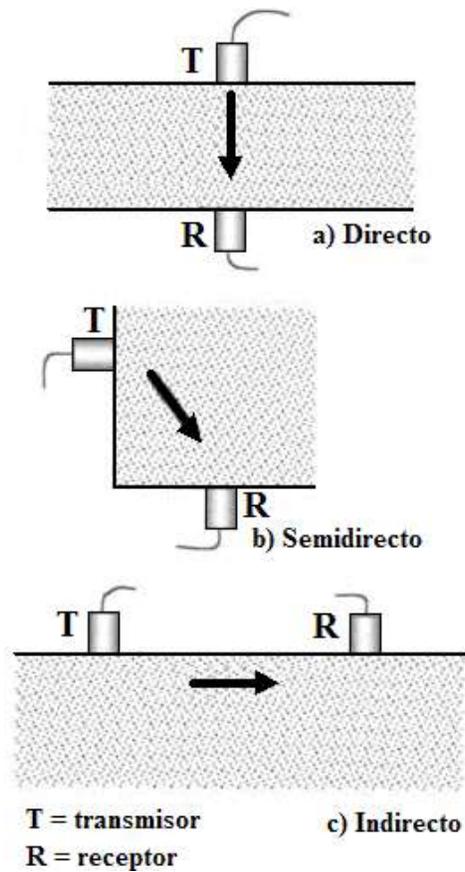


Ilustración 2.12.2.1-2. Posibles formas de colocación de los transductores

La distancia X muestra cuando se da el cambio de pendiente es medida y el espesor de la capa superior, t , es estimado a partir de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{X}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad \text{ECU. [9]}$$

Este método es solamente adecuado cuando la capa superior, (la capa de baja calidad) es distinta, es razonablemente del mismo espesor, y $V_2 > V_1$.

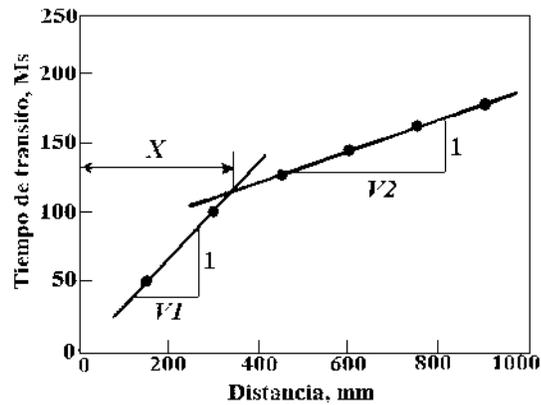
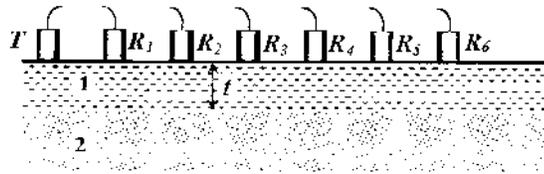


Ilustración 2.12.2.1-3. Gráfica tiempo distancia de la pendiente para determinar la velocidad de pulso



Ilustración 2.12.2.1-4. Aparato para medir la velocidad de pulso del cilindro de concreto.

2.13. Regresión lineal múltiple

Existen muchas técnicas de regresión en función del tipo de variables y de la forma funcional supuesta entre ellas. Las más elementales (aunque las más potentes en el

sentido de que se puede obtener más información) son las lineales. La regresión lineal supone que la relación entre dos variables tiene una forma lineal (o linealizable mediante alguna transformación de las variables). La regresión lineal tiene una versión “simple” que empareja dos variables, pero esta suele ser insuficiente para entender fenómenos mínimamente complejos en la que influyen más de dos variables, esta versión es la “múltiple”. En el modelo de regresión lineal múltiple suponemos que más de una variable tiene influencia o está correlacionada con el valor de una tercera variable (Montero Granados, 2016).

En regresión se trabaja con variables. Y lo que se hace es calcular siempre promedios (promedio de una variable, de una correlación, de una tendencia, de una función, de una ratio; promedios de variables estandarizadas, estudentizadas o refuncionalizadas con cualquier otra función) y su desviación típica (la desviación típica es una denominación que se reserva a la muestra y a la población, cuando se refiere a un parámetro estimado - la media, la tendencia u otro - se suele denominar error estándar).

Para que los resultados de la regresión sean “confiables” (confiable es una forma coloquial de referirse a: insesgados, es decir que sus resultados sean parecidos a los reales; y óptimos, es decir que su varianza sea mínima) es necesario que:

- a) La relación entre las variables sea lineal. Ser lineal no significa que forzosamente tenga que ser una línea recta sino también que pueda ser lineal con alguna transformación.
- b) Las perturbaciones (es decir los efectos provocados aleatoriamente o por variables no incluidas en el modelo) deben ser: de media cero, homocedásticas y no auto correlacionadas. Se suelen resumir estos bajo la denominación de “esfericidad” de los residuos.

En el modelo de regresión lineal múltiple se supone que la función de regresión que relaciona la variable dependiente con las variables independientes es lineal, es decir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad \text{ECU. [10]}$$

Donde:

Y = variable dependiente

$X_1 + X_2 + \dots + X_p$ = conjunto de variables independientes

$\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_p$ = coeficientes de regresión

ε = componente aleatorio de error.

2.13.1. Coeficiente de correlación

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no proceder a aplicarse la correlación de Pearson. Por ejemplo, la relación entre la ansiedad y el rendimiento tiene forma de U invertida; igualmente, si relacionamos población y tiempo la relación será de forma exponencial. En estos casos (y en otros muchos) no es conveniente utilizar la correlación de Pearson. Insistimos en este punto, que parece olvidarse con cierta frecuencia.

De manera menos formal, podemos definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas.

La fórmula para calcular un coeficiente de correlación utiliza medias, desviaciones estándar y la cantidad de pares de tu conjunto de datos (que se representa a través de la letra n).

$$R = \frac{1}{(n-1)} \sum \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right) * \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right) \quad \text{ECU. [11]}$$

Donde:

n = cantidad de pares de tu conjunto de datos

x = variable independiente

y = variable dependiente

μ_x = media de x

μ_y = media de y

σ_x = desviación estándar de x

σ_y = desviación estándar de y

El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$, indicando el signo el sentido de la relación:

Se pueden tener las siguientes posibilidades:

Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.

Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.

Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.

Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

3. METODOLOGIA

3.1. Materiales usados en la investigación

3.2. Cuarteo

El cuarteo es un método es un método requerido para reducir la muestra de materiales agregados obtenidos en campo a una cantidad necesaria u óptima para las pruebas que se quiere hacer sin que esto afecte sus características y solo se aplicará en muestras más o menos homogéneas, si no es así se tendrá que hacer un estudio al material en cuestión.

Con esto se quiere obtener una muestra representativa del campo, el material obtenido en campo debe ser mayor al que se ocupa para las pruebas, el material se reduce de acuerdo al ensayo en cuestión que se le vaya a aplicar.

EQUIPO

- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.
- Brochas o cepillos de pelo.
- Balanza o básculas.
- Divisor de muestras.
- Traza de plástico flexibles de 40 por 40 centímetros.

Existen 3 tipos de procedimientos usuales para efectuar el cuarteo de las muestras:

Método "A" Cuarteo Mecánico

Procedimiento para divisor de muestras

Se toma la muestra previamente puesta en una charola ancha y se vacía sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.

El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.

Método "B" Cuarteo Manual

Procedimiento por cuarteo con palas

- 1.- Se vacía la muestra de material en uno de los extremos de la charola grande
- 2.- Se cambia el material al extremo opuesto, este cambio deberá hacerse por medio del papeleado, tratando de revolver todo el material, además se procurará apilar el material en forma cónica. Este procedimiento se repite tres veces.
- 3.- Una vez terminado el paso anterior el material apilado en forma cónica se aplana la parte superior por medio de la cara posterior de la pala y después se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal aplana del material, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes. Si se desea disminuir el tamaño de la muestra se repite el procedimiento anterior señalado.

Procedimiento con el trozo de plástico.

Cuando el material del piso pueda contaminar la muestra de campo.

- 1.- Se coloca el trozo de plástico sobre la superficie de una mesa, posteriormente se coloca el material en la parte central del plástico.
- 2.- Se levantan los dos extremos opuestos del plástico y se una a continuación, se regresa a la posición original del trozo de plástico. Enseguida se levantan los otros dos extremos opuestos y se unen, posteriormente se regresan a su posición original. Este proceso se repite varias veces hasta obtener una muestra homogénea.

3.- Se elimina la mitad del material ya revuelto, para lo cual se lleva el trozo de plástico con el material, hasta el bordo de la mesa, de tal manera que la mitad del plástico quede sobre la muestra y la otra mitad en el aire sujeta con una de las manos, cogiendo el extremo que esta sobre la mesa, se suelta el extremo que está en el aire con lo cual se elimina la mitad del material. Este deberá ser recibido en un recipiente.

Cuando se utilice este último método para una mayor cantidad de material se utilizará una lona de aproximadamente 2.0 m x 2.5 m. El procedimiento será el mismo.

Las muestras de campo de agregado fino se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método "A", Las muestras de campo que se reduzcan por el método "B" deben encontrarse húmedas superficialmente de no ser así se deben humedecer y después deben ser remezcladas (NMX C-170, 1997).

En nuestro cuarteo se hizo de la manera "B", vaciando el material en el divisor de muestras a través de toda su longitud hasta quedar separado en dos partes y así poder usar la cantidad deseada para las pruebas.

En la siguiente imagen se puede apreciar cómo se está vertiendo la arena o el material al divisor de muestras.



Ilustración 3.2-1. Cuarteo de material granular fino, con divisor de muestras.

3.3.Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (mvss)

El objetivo de esta prueba es obtener la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es de forma libre y natural.

Equipo:

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula.
- Un cucharon y una pala.

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.

Calculo

$$M.V.S.S = M/V$$

M.V.S.S. = Masa Volumétrica Seca Suelta (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³). (NMX C-073-ONNCCE, 2004)

Primero vaciamos la muestra de nuestro material en un montículo y se le dio un paleado hacia un lado y luego hacia el otro, esto para que el material quedara muy bien revuelto,

después el montículo que quedo se aplana de la parte superior hacia abajo con la pala hasta como un tercio de la altura más o menos y luego se separa en 4 partes con las palas, luego se coloca una charola grande de aluminio en medio de las 4 partes procurando limpiar restos del material en la superficie debajo de la charola para evitar que se mueva y quede perfectamente postrada en el suelo y con el cucharon se empieza a vaciar el material de una de las esquinas a la charola dejando caer el material a cierta altura hasta llenarlo, posteriormente verter el material a una altura de cinco centímetros de altura del recipiente aproximadamente hasta llenar el recipiente, se va a hacer como un montículo arriba de la charola de lámina, para posteriormente pesarla, y a esa masa total se le resta la masa del recipiente y tendrás la masa de la arena, ahora el volumen del recipiente ya está marcado y lo conoces así que solo divides la masa de la arena entre el volumen del recipiente y obtienes la masa volumétrica seca suelta en gr/cm^3 .



Ilustración 3.3-1

Ilustración 3.3-2

Homogenización del material

En las ilustraciones 3.3-1 y 3.3-2 se coloca el material en un montículo para posteriormente hacer las paleadas de un lado hacia otro y que el material quede lo más homogéneo posible.



Ilustración 3.3-2 . Cuarteo de la arena

En la ilustración 3.3-3 se hace el cuarteo dividiendo la muestra en cuatro porciones.

3.4.Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (mvsv)

El objetivo es obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

Equipo:

- Una muestra de arena completamente seca.
- Un recipiente de peso y volumen conocido.
- Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.
- Una balanza o báscula. Un cucharón y una pala.

Se procede a llenar el recipiente con arena a voltea 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.

Calculo

$$M.V.S.V = M/V \quad \text{ECU. [12]}$$

M.V.S.V. = Masa Volumétrica Seca y Varillada (gramos/cm³).

M = Masa de la arena (gramos).

V = Volumen del recipiente (cm³).

(NMX C-073-ONNCCE, 2004)

Primero separamos el material en cuatro partes iguales, posteriormente con el cucharon se tomó material de dos extremos opuestos y se fue llenando primero con un cuarto y si se terminaba el material se empieza con el otro extremo, se vació o vertió el material sobre el molde de lámina a una altura aproximadamente de 5 centímetros de altura del recipiente hasta un tercio de la altura del recipiente, luego se le dio 25 varilladas y así a cada capa que se hizo, fueron tres capas en total, después se pesó el recipiente con el material y se le resto a eso el peso del molde o recipiente de lámina para obtener la masa de la arena y así dividirla entre el volumen del recipiente y así obtener la masa volumétrica seca y varillada.



Ilustración 3.4-1

Vertido del material en el recipiente



Ilustración 3.4-2

Varillado de capas

En la ilustración 3.4-1, se vierte el material en el recipiente de metal dejándose caer del cucharon a una altura aproximada de 5 cm.

En la ilustración 3.4-2, se varilla por cada capa y se le dan 25 varilladas a cada capa.

En las ilustraciones 3.4-3 y 3.4-4, se está enrasando el recipiente de lámina después de haberse llenado y posteriormente se pesa ya lleno para obtener la masa.



Ilustración 3.4-3.
Enrasado de agregado fino



Ilustración 3.4-4.
Pesado de agregado fino

3.5. Análisis granulométrico en arena

El objetivo 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.

Equipo:

- Un juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16, 30, 50, 100 y charolas con su respectiva tapa.
- Una balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.
- Charolas, espántalas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

1.- Se toma una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.

2.- Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de no mayor de 110°C.

3.- Cuando el material este seco y frio, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo

4.- Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.

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

6.- 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 limpiaran con el cepillo de cerdas.

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



Ilustración 3.5-1. Pesado del material fino



Ilustración 3.5-2. Cribado del material fino

En las ilustraciones 3.5-3 y 3.5-4, el material está siendo vaciado posteriormente de haberse pesado, para después ser cribado por mallas finas del número 4,8,16,30,50 y 100.

3.6.Densidad de la arena

El objetivo es determinar el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

Equipo:

- Muestra representativa de arena de aproximadamente 1000 gramos.
- Charolas.
- Espátulas.
- Parrilla eléctrica.
- Molde tronco cónico.
- Pizón.
- Probeta.
- Frasco.
- Vidrio.
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

1.- Utilizando una 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.

2.- En la probeta se coloca un volumen de agua conocido, registrándolo como volumen inicial V_i en cm^3 . 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.

3.- 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 V_f .

Calculo

$$DA = M_a / V_f - V_i \quad \text{ECU. [13]}$$

DA = Densidad de la Arena en gr/cm^3 .

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

$V_f - V_i$ = Volumen colocado dentro de la probeta en cm^3 .

Después de haber puesto la arena a saturar 24 horas, se puso a calentar la arena en la parrilla de gas para secarla hasta el punto deseado, al mismo tiempo que esto se hace, se colocó agua en la probeta esto era un volumen conocido, después se coloca la arena en el molde cónico que es como se averigua que tanta humedad tiene y para saber hasta cuando calentar más la arena, se pesa la cantidad de arena que se va a colocar en la probeta y después se coloca la arena dentro de la probeta, se queda material en las paredes de la probeta y se le da vuelta lentamente para limpiar las paredes y después se toma el incremento de volumen para restarle el que ya tenía inicialmente la probeta y así poder hacer la fórmula del DA .



CARLOS FERRE

EVA



Ilustración 3.6-1

Secado del material con la parrilla

Ilustración 3.6-2

Prueba de secado del material fino

En las ilustraciones 3.6-1 y 3.6-2, respectivamente se está secando el material en la parrilla para posteriormente hacer la prueba con el molde cónico y determinar si ya está lo suficientemente seco el material.



Ilustración 3.6-3. Probeta con agua

En la ilustración 3.6-3, se colocó un volumen de agua requerido en la probeta.



Ilustración 3.6-4. Probeta con agua y muestra del material cribado

En la ilustración 3.6-4, Se vacía el material que ya está suficientemente seco en la probeta con agua.

3.7.Muestreo en gravas

Obtener una muestra representativa de este material para llevarla al laboratorio y realizarle las pruebas correspondientes para su estudio respectivo.

Equipo:

- Medio de transporte.
- Costales.
- Palas.
- Cucharones.
- Bolsas de plástico.

1.- Dependiendo del estudio que se va a realizar se debe elegir el tamaño de la muestra, por ejemplo, para realizar estudios para un proporcionamiento se debe obtener una muestra de 50 kilogramos aproximadamente.

2.- Si el muestreo se realiza en los bancos de material se debe de tomar este del frente que se vaya a utilizar en la obra respectiva, por lo que de nada nos servirá hacer un estudio de un material equivocado o del que no se vaya a utilizar.

3.- La muestra debe de reunir las características de todo el material en general, para que esta sea realmente representativa, (tamaño, colores, formas, etc.)

4.- También el muestreo se puede realizar en los camiones que suministran a las obras, así mismo del que se encuentra en las obras, esto nos sirve para verificar la calidad de los materiales (NMX-C-030-ONNCCE, 2004).

En esta prueba se obtuvo el material de un banco de material llamado Joyitas y se trajo la cajuela de una camioneta medio llena y después con palas se colocó en el cajón del laboratorio donde se guarda el material.



Ilustración 3.7-1. Secado de material

En la ilustración 3.7-1 se extiende el material en una superficie plana para un secado uniforme, en este caso el material es grava.



Ilustración 3.7-2. Cuarteo del material

En la ilustración 3.7-2 se realiza el cuarteo del material separando bien sus cuatro secciones o divisiones.



Ilustración 3.7-3. Vertiendo el material en el recipiente de lamina

En la ilustración 3.7-3 se llena el molde con el cucharón dejando caer el material a 5 cm aproximadamente de la base superior del molde de lámina.



Ilustración 3.7-4. Enrasado manual del material grueso

En la ilustración 3.7-4 se enrasa el recipiente ya lleno con el material, y en vez de hacerlo con la varilla como en la arena, se hace con las manos.



Ilustración 3.7-5. Pesado del material

En la ilustración 3.7-5 se pesa el molde lleno con el material para después restarle el peso del molde y así obtener el peso del material.

3.8. Cuarteo de gravas

El objetivo es obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado para realizar la prueba correspondiente al material de estudio.

Equipo:

- Palas.
- Charolas.
- Escobas.
- Cepillo.

- Cuarteador de muestras.

Para realizar el cuarteo de gravas existen dos métodos:

- 1.- Cuarteo por paleado.
- 2.- Cuarteo con el divisor de muestras.

(NMX-C-030-ONNCCE, 2004)

En esta prueba igual que con el cuarteo de la arena se puso el material en un montículo y con las palas se aplanaba el montículo hacia abajo a la mitad más o menos, luego eso se separó en 4 partes para tomar el material de uno de los dos extremos para hacer el MVSS y el MVSV.

En estas imágenes se puede apreciar cómo se homogeniza el material, después como el montículo se aplanaba y posteriormente se divide en 4 partes en ese orden.



Ilustración 3.8-1. Homogenización del material

En la ilustración 3.8-1 se mueve el material de izquierda a derecha de 2 a 3 veces, para homogeneizarlo.



Ilustración 3.8-2. Aplanado del material

En la ilustración 3.8-2 el montículo de material se apila y después con una pala se aplanan.



Ilustración 3.8-3. Cuarteo del material

En la ilustración 3.8-3 se hace el cuarteo dividiendo la pila de material en cuatro partes iguales y se separa bien.

3.9. Humedad actual en gravas

Determinar la cantidad de agua que contiene una grava, en estado natural, es decir, en el momento que va ser utilizada.

Equipo:

- Muestra representativa de 1000 gramos de aproximación.
- Charola metálica.
- Espátula.
- Parrilla eléctrica.
- Vidrio.

- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

1.- Se toma una muestra representativa de 400 a 500 gr y se determina su masa, restringiéndola como masa húmeda Mh.

2.- Enseguida se coloca en una 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 esta seca colocamos 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.

3.- Cuando esta 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.

Calculo:

$$\% \text{ H. Actual} = [(Mh - Ms) / Ms] * 100 \quad \text{ECU. [14]}$$

% H. Actual = Porcentaje de humedad.

Mh = Masa humedad de la grava en gramos.

Ms = Masa seca en gramos.

(NMX C-166-ONNCCE, 2018)

En las siguientes imágenes de acuerdo con el seguimiento de la prueba como se leyó antes en la primera imagen se puede apreciar cómo es que se está secando el material con el que se va a trabajar, en la segunda imagen se ve como con el vidrio se está revisando si aun después del tiempo que lleva en el calor le queda todavía humedad, ya que si aún le queda se empañara el vidrio y si no es que ya está listo, y por ultimo ya que el material se encuentra listo se coloca en la báscula para medir su peso seco después de que se haya

enfriado un poco, no se puede pesar aún caliente.



Ilustración 3.9-1. Secado del material

En la ilustración 3.9-1. Se calienta la grava en la parrilla eléctrica para secar el material.



Ilustración 3.9-2. Determinación de humedad

En la ilustración 3.9-2. Se coloca el panel de vidrio para observar si se empaña, y si esto ocurre significa que aún tiene humedad el material y debe dejarse secando aún más tiempo.



Ilustración 3.9-3. Pesado del material

En la ilustración 3.9-3. En esta foto se ve la muestra que se pesa ya que esta seca y que se enfrié, ya que puede variar el peso si se pesa el material caliente.

3.10. Humedad de absorción en gravas

El objetivo es determinar la capacidad máxima de absorción de una grava expresándola en porcentaje respecto a su peso seco.

Equipo:

- Muestra de grava de aproximadamente un kilogramo.
- Franela.
- Charolas metálicas.
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Mallas de 3/4 y 3/8".
- Balanza con aproximación al décimo de gramo.

1.- 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 de 3/4 y se retiene en 3/8 se pone a saturar en una charola una muestra de 0.5 a 1.0 kilogramo durante 24 horas.

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

3.- Se procede a colocar este material en una charola para secarlo en la parrilla eléctrica, para saber cuándo se ha 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 registrando como masa seca (Ms).

Cálculos:

$$\%H. \text{ Absorción} = ((Mh - Ms) / Ms) * 100 \quad \text{ECU. [15]}$$

Mh = Masa saturada y superficialmente seca de la grava en gramos.

Ms = Masa seca de la grava en gramos.



Ilustración 3.10-1. Cribado del material

En las ilustraciones 3.10-1, mallas de 3/4 y 3/8" para hacer el cribado del material grueso.



Ilustración 3.10-2. Elaboración del cribado del material

En la ilustración 3.10-2 se observa a los laboratoristas haciendo el cribado con las mallas 3/4 y 3/8 para determinar cuál material pasa y cual queda retenido en cada malla.

3.11. Densidad en gravas

El objetivo es determinar el volumen absoluto de las partículas de grava en masa por unidad de volumen.

Equipo:

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

1.- 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).

2.- 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.

Calculo:

$$D = M/V \quad \text{ECU. [16]}$$

D = Densidad en g/cm^3 .

M = Masa de la grava en g.

V = Volumen de la grava cm^3 .



Ilustración 3.11-1. Material saturado

En la ilustración 3.11-1, charola con material saturado que se va a tener que secar superficialmente con una franela.



Ilustración 3.11-2. Pesado del material

En la ilustración 3.11-2, material secado superficialmente con una franela y pesado en la báscula.



Ilustración 3.11-3. Picnómetro desalojando un volumen de agua

En las ilustraciones 3.11-3, se introduce el material secado superficialmente dentro de un picnómetro con agua hasta cierto nivel marcado, y el líquido que sale por la boquilla del picnómetro cae en una probeta graduada y se mide el volumen de ese líquido para obtener el volumen del material.

3.12. Masa volumétrica seca y suelta en gravas (mvss)

El objetivo de la prueba es determinar la masa por unidad de volumen cuando la grava se encuentra en estado natural seco y suelto.

Equipo:

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Recipiente con un volumen de 10 litros.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Cucharón.
- Pala.
- Rastrillo.

1.- Se seca la muestra hasta masa constante, esto se puede realizar extendiendo el material con el rastrillo al sol para lograr el secado.

2.- Cuando el material este completamente seco, se continua con el siguiente procedimiento.

3.- Primeramente, se determina la masa y el volumen del recipiente que vamos a utilizar. Enseguida con el cucharón se va llenando 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.

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

Cálculos:

M.V.S.S = Masa de la grava/ Volumen de la grava

ECU. [17]



Ilustración 3.12-1. Pesado de un volumen de grava seca y suelta

En la ilustración 3.12-1, se llena el recipiente de lámina con la muestra de la grava sin varillar, se deja caer con el cucharon a una altura de 5 cm aproximadamente por encima de la parte superior hasta que se llene y se enrasa.

3.13. Masa volumétrica seca y varillada en gravas (mvsv)

El objetivo es obtener la masa de la grava por unidad de volumen cuando es sometida a cierto grado de compactación.

Equipo:

- Muestra representativa de grava de aproximadamente 15 kilogramos.
- Recipiente de 10 litros de volumen.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Cucharón.
- Pala.
- Varilla punta de bala.

1.- 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.

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

3.- 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.

Cálculos:

M.V.S.V. = Masa de la grava compactada / Volumen de la grava **ECU. [18]**



Ilustración 3.13-1. Capas de grava siendo varilladas

En la ilustración 3.13-1, se varilla cada capa de grava que se le agrega al recipiente, se le dan 25 golpes y se llena en tres capas.

3.14. Análisis granulométrico en gravas

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

Equipo:

- Muestra aproximadamente 15 kilogramos en estado suelto.
- Juego de mallas: 2", 1 ½", 1", ¾", ½", ⅜", ¼", y N° 4.
- Juego de charolas para recibir el material que se retiene en cada una de las mallas.
- Balanza con aproximación al gramo.
- Recipiente de 10 litros.

1.- 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 muestra de la masa registrándose como la masa de la muestra (Mm).

2.- Enseguida se pasa la grava a través de las mallas colocándolas de la mayor a la menor, 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 realizarse este procedimiento se elabora una tabla como a continuación se indica, registrando las masas retenidas en cada una de las mallas correspondientes.

Calculo:

Al realizar la suma de las masas parciales retenidas debe ser igual al peso de la muestra inicial, teniendo una tolerancia de +-1 % del peso de la muestra.

El porcentaje retenido se calcula con:

$$\% \text{ retenido} = (\text{Masa retenida en la malla} / \text{Masa de la muestra}) * 100 \quad \text{ECU. [19]}$$

El porcentaje acumulado se calcula de la siguiente manera:

$\% \text{ Acumulativo malla} = \% \text{ acumulado} + \% \text{ retenido malla}$

El porcentaje de la malla que pasa:

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

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 (NORMA NMX C-111-ONNCCE, 2018).

3.15. Pruebas al concreto fresco

3.15.1. Revenimiento

El objetivo es medir la consistencia, plasticidad y trabajabilidad del concreto fresco en términos de la disminución de altura.

Equipo:

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

1.- Se obtiene una muestra representativa en una charola como ya se explicó en la práctica anterior.

2.- Se humedece el molde de revenimiento y el cucharón.

3.- Se coloca el molde en una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente y se sujeta colocando los pies en las orejas que tienen especialmente para ello.

4.- Se mezcla el concreto y se vierte usando el cucharón, se llena el molde con 3 capas aproximadamente de igual volumen., la primera capa corresponde aproximadamente a una altura de 7 cm, se le dan 25 golpes con la varilla punta de bala, la mitad se hará en forma inclinada, (esto por la forma del molde), por la periferia del molde, los demás en forma vertical.

5.- La segunda capa debe de llegar a una altura de aproximadamente 15 cm, dando de la misma manera 25 golpes, pero con el cuidado de no pasar a la primera capa, esto es

porque la primera capa tendría más de 25 golpes lo que da un mayor acomodo y como resultado un mayor revenimiento.

6.- Y la tercera capa se llena al extremo del molde calculando que quede sobrado, es decir, que sobrepase un nivel para que al varillar 25 veces la tercera capa el nivel sobre pase ligeramente el nivel de enrase del mismo. Si quedara por debajo del nivel se le agrega más concreto hasta llegar al nivel de enrase del molde.

7.- Se enrasa el molde rodando la varilla sobre la superficie superior del molde.

8.- E inmediatamente levantar el molde con cuidado en dirección vertical. La operación para levantar completamente el molde de 30 cm de altura debe hacerse en 5 s más menos 2 s, alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación desde el comienzo del llenado hasta que levanta el molde debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min, debido a la fluidez del concreto este tendero a derrumbarse de la forma del cono hasta incluso quedar extendido sobre la superficie horizontal.

9.- Se medirá con un flexómetro ese derrumbe, colocando el molde usado en la prueba cerca de la mezcla, colocando la varilla sobre el molde, se medirá del nivel de enrase del molde y la altura promedio del cono que forme la mezcla al soltarla.

Si al retirar la punta del cono de concreto claramente se va hacia un lado o se corta completamente se deshecha la prueba y se repita con otra muestra.

Revenimiento nominal menor de 50, tiene una tolerancia de más menos 15 mm.

Revenimiento nominal de 50 a 100, tiene una tolerancia de más menos 25 mm.

Revenimiento nominal mayor de 100, tiene una tolerancia de más menos 35 mm.



Ilustración 3.15.1-1. Llenado de la primera capa del cono de revenimiento

En la ilustración 3.15.1-1 se el cono de revenimiento de concreto fresco con el cucharón, puesto y fijo con los pies sobre las orejas en el molde metálico, esto es para que no pierda humedad ni se infiltre el agua.



Ilustración 3.15.1-2. Llenando la última capa del cono de revenimiento para posteriormente aplanar la superficie.



Ilustración 3.15.1-3. Midiendo el revenimiento con cinta métrica.

3.16. Pruebas en concreto endurecido

3.16.1. Compresión simple

La prueba de compresión simple es la prueba que se utiliza para saber cuánto puede resistir un cilindro de concreto cuando lo sometemos a una carga axial, ya que esto nos indicara si se ha logrado el objetivo del diseño de mezcla preestablecido y saber realmente si alcanzo la resistencia deseada de acuerdo con la edad del concreto, con ello podemos

saber teóricamente cuanto debería resistir hasta ese día ya que sabemos los porcentajes de resistencia a diferentes edades.

En esta prueba primero se tiene que esperar hasta que el cilindro de concreto haya cumplido cierta edad reposando en una pila de curado para que no pierda nada de humedad, esto es sumergido en agua que no esté contaminada con nada que pueda interactuar o causar una reacción en el concreto sino esto afectara su resistencia.

Ya que sea el día de la prueba se retirarán los cilindros de la pila de concreto, nosotros lo hacíamos con 3 cilindros a edades de 3, 7, 14, 21, 28 y 45 días, y también a diferentes mezclas, de $f'c$ 150, 250 y 350 Kg/cm².

Se retiran 3 cilindros de la pila de curado, se les quita la humedad en exceso, pero sin que quede muy secos, se llevan a hacerles cabeceados para que sus caras con rugosidades queden casi perfectamente planas, el cabeceado se hace con azufre que se calienta en un recipiente hasta que queda líquido, de ahí se colocan unos moldes que serán las caras superior e inferior del cilindro de concreto y se engrasan con aceite para que a la hora de hacer el cabeceado la cara de azufre no se pegue al molde y no se quebré a la hora de retirarlo de ahí, y se quede bien sujeto al cilindro en sus dos caras, posteriormente del engrasado se vierte el azufre caliente y líquido hasta un nivel en el molde, son dos moldes uno más profundo para la cara más rugosa del cilindro y otro más superficial para la cara más lisa del cilindro ya que si se utiliza el más superficial para la cara más rugosa se despegara el cabeceo ya que no alcanzara a cubrir bien las deformidades, se vierte y se coloca rápidamente pero con cuidado el cilindro ya que el azufre se enfría rápido y después se deja unos segundos a que seque y ahora si se retira y listo.

Los cilindros ya cabeceados se llevan a la máquina de compresión o la compresora donde se cargarán, se colocan muy bien centrados con el disco que comprimirá la cara superior del cilindro en la máquina, se ajusta la velocidad a la que se comprimirá o cargará la máquina y el operador bajara el disco de la compresora lentamente hasta hacer contacto con la cara superior del cilindro para que no exista una falla por impacto, esto después de haber hecho dos precargas para obtener los módulos de deformación, y ahora si se comienza a

cargar y la maquina va tomando lectura de cuanta carga va ejerciendo en toneladas, el operador deberá estar atento a la lectura de la carga ya que irá subiendo gradualmente hasta que en un punto la carga ya no suba y empiece a bajar, esto indicara que el cilindro ya fallo, en ese momento se tiene que retirar la carga y en un botón donde se está dando al lectura de la maquina lo presionas y ahí te dirá cuál fue la carga máxima o de falla que resistió el cilindro, esta se anota y ya se puede retirar todo con cuidado, el cilindro y las partes desprendidas.



Ilustración 3.16.1-1. Azufre calentándose en la parrilla para cabeceo de cilindros

En la ilustración 3.16.1-1, se calienta el azufre para que se vuelva líquido y poder verterlo en los moldes para el cabeceo de los cilindros de concreto.



Ilustración 3.16.1-2. Azufre liquido vertiéndose en el molde de cabeceo



Ilustración 3.16.1-3. Cilindro cabeceado

En la ilustración 3.16.1-3, se retira el cilindro del molde después de que el azufre líquido se haya secado, y así se tendrán las caras cabeceadas para que posteriormente se puedan probar a carga axial.



Ilustración 3.16.1-4. Cilindro y cubo de concreto a punto de ser cargados a compresión

En la ilustración 3.16.1-4, se coloca el cilindro de concreto cabeceado en la compresora con una bandeja de metal por debajo para que alcance la altura necesaria y en disco de la compresora no tenga que bajar tanto y quede a una altura ideal para empezar a ponerle carga de forma muy lenta y no cause problemas por impacto, lo mismo para los cubos, solo que estos no se cabecean.

3.16.2. Módulo de elasticidad

Ya que se tienen los cilindros que se retiraron de la pila de curado y se secaron superficialmente se les va a cargar en la compresora, y se le aplicará una carga del 12% de lo que debería resistir por norma, esto se le llama una precarga y se retira de la máquina.

Posteriormente se les coloca alrededor de ellos en la parte inferior y superior unos anillos que servirán como base para saber que tanto se deforma, ya que enfrente de el en una pequeña base ira sujeto un micrómetro que marcara el desplazamiento de la deformación aproximado a centésimos de mm, este micrómetro va en la parte delantera para poder observar cuanto se va desplazando al aplicar la carga y poder tomar nota de ello.

Después de ser colocados y nivelados los anillos se coloca en la compresa y e igual que en la compresión simple se baja el disco con cuidado hasta hacer contacto con la cara superior del cilindro, posteriormente se le aplicara una carga del 40% de su resistencia y se ira tomando una lectura de carga cada que se deforme 0.01 mm hasta llegar a ese 40% se detiene la carga y se utilizan solo las lecturas que se hayan alcanzado a tomar en ese lapso de 0 a 40% de la carga.



Ilustración 3.16.2-1. Colocación de los anillos perimetrales de medición para la deformación

En la ilustración 3.16.2-1, se colocan los anillos alrededor del cilindro de concreto del que se va a obtener los modelos, estos anillos son para colocar el micrómetro que medirá el desplazamiento de la deformación del cilindro sometido a una carga.



Ilustración 3.16.2-2. Anillos para deformación colocados y nivelados

En la ilustración 3.16.2-2, después de colocar los anillos alrededor del cilindro de concreto, estos se tienen que nivelar para que la base del micrómetro este recto y no inclinada y así se garantiza una lectura inicial de cero deformaciones.



Ilustración 3.16.2-3. Compresora aplicando carga a cilindro para obtener módulos de deformación

En la ilustración 3.16.2-3, ya que el cilindro este con los anillos puestos, nivelados y con el micrómetro en ceros, se coloca en la compresora para empezar a aplicar las precargas, mientras se aplica la carga uno está al pendiente de cada que el micrómetro avanza 0.01

mm de deformación para indicarle a otro compañero y este a su vez anote la carga que se indica en la maquina en el segundo que se está avisando de ese desplazamiento de 0.01 mm.

3.17. Pruebas no destructivas

3.17.1. Resistividad eléctrica

En esta prueba de resistividad eléctrica se mide oposición que tiene el material para dejar conducir la electricidad a través de él, para ello ocupamos un aparato llamado resistómetro, este aparato se enciende y se ajusta la manija a la posición 0, se coloca el cilindro de concreto húmedo verticalmente posicionado y en la parte de arriba y abajo se le colocan dos placas de metal en forma de circulo del mismo tamaño que la cara del cilindro y entre las placas de metal y las caras del cilindro superior e inferior se coloca un pedazo de trapo húmedo, esto para que el agua del trapo húmedo sirva como conductor a través de la placa y el cilindro ya que si colocáramos solo la placa por el relieve o textura del cilindro de concreto no haría al cien por ciento contacto con el cilindro y no habría buena conducción.

Luego en una pequeña parte de las placas de metal, tienen como un pico, ahí se colocan unos cables que harán tierra, una arriba y otro abajo y posteriormente el otro extremo del cable se enchufa a la batería que está encendida y ajustada, se conecta una a cada lado de la batería, una entrada es roja y la otra negra.

Posteriormente a esto, se tiene que mediante la batería subir el potencial de la máquina, hasta que en una marca una aguja que mide el potencial salta y sobrepasa una marca en medio del medidor, en donde la manija giro para provocar el valor es un número que se va a multiplica por la lectura que se hará posteriormente al medir su conductividad.

Posteriormente ahora si se empieza a medir la conductividad con la misma manija y una palanquita que se hace hacia abajo y se vuelve a observar donde la aguja sobrepasa la

marca de en medio del medidor y a esa lectura se multiplica por el dato anteriormente encontrado y esa sería la resistividad eléctrica en Ohms-cm.



Ilustración 3.17.1-1. Tablero preparado de la pila de la máquina de resistividad eléctrica

En la ilustración 3.17.1-1, se observa la máquina de resistividad eléctrica, primero se colocan los cables rojo y negro intercalados en sus destinadas posiciones a la pila, estos se conectan con los ganchos a unas placas metálicas que se le colocaran a las caras de los cilindros de concreto y cubos también y las perillas se colocan en ceros.



Ilustración 3.17.1-2. Cara del cilindro siendo lijada

En la ilustración 3.17.1-2, se está lijando la cara del cilindro, esto se hace para dejar más regular la cara y no existan tantas imperfecciones ya que de lo contrario la placa no hará buen contacto en toda la superficie de la carga y no se conducirá bien la electricidad.



Ilustración 3.17.1-3. Realizando prueba de resistividad eléctrica

En la ilustración 3.17.1-3, se colocan las placas metálicas en las caras del cilindro y los pañuelos húmedos entre la placa y el cilindro para que exista mejor conductividad y se coloca un cilindro en la superior para que no se mueva durante la prueba.

3.17.2. Velocidad de pulso ultrasónico

En esta prueba se quiere determinar qué tan conductor es el cilindro de concreto para evaluar su calidad ya que esto se asocia directamente con su porosidad o si tiene grietas, o si tiene daños internos por abrasiones químicas, ya que entre más porosidad o discontinuidades tenga en su interior el pulso eléctrico tardará más en llegar de un lado hacia el otro debido a la dispersión por espacios vacíos y si esto sucede evidentemente tendrá menos resistencia, esto se hace a través de ondas mecánicas programadas por la máquina que no causan ningún daño al concreto y se debe hacer la prueba varias veces en el mismo sitio de localización de los transductores de la batería que manda el pulso

eléctrico, para el monitoreo del concreto y ver si no se ha sometido a cambios estructurales internos.

Consta de un generador de pulso eléctrico, un par de transductores, unos amplificadores, un dispositivo de medición de tiempo, una pantalla de proyección del tiempo y cables de conexión.

El generador de pulso consiste en un circuito que produce pulsos de voltaje entre 500 y 1000 voltios, esto debe producir 3 pulsos por segundo. Los transductores transforman los pulsos en ondas cuya frecuencia de resonancia depende del transductor que se utilice; las frecuencias bajas se utilizan para grandes distancias ("L") mientras que altas frecuencias son para distancias pequeñas desde 10cm. Esto se debe a que los pulsos de alta frecuencia se atenúan más rápido que los de baja frecuencia al paso por el concreto.

Según la norma ACI 228 es recomendado que se realicen 5 lecturas de velocidad en el análisis, sin embargo, por efectos de calibración se pueden realizar 3 lecturas para cada cubo o una lectura para cada cilindro poco antes de que estos sean sometidos a alguna prueba destructiva. Se debe determinar el promedio de la velocidad, si se tiene para el espécimen más de una lectura.

En la tabla 8, podemos ver la clasificación del concreto de acuerdo a su velocidad de pulso.

Tabla	Velocidad ultrasónica, v	Clasificación del	8:
del	(m/s)	concreto	Clasificación
su	$V > 4\ 575$	Excelente	concreto de
de	$4\ 575 > V > 3\ 660$	Bueno	acuerdo a
	$3\ 660 > V > 3\ 050$	Cuestionable	velocidad
	$3\ 050 > V > 2\ 135$	Pobre	pulso
	$V < 2\ 135$	Muy pobre	



Ilustración 3.17.2-1.
Calibrando el equipo de velocidad de pulso



Ilustración 3.17.2-2.
Colocando gel en los transductores

En la ilustración 3.17.2-1 se aprecia cómo se tiene que calibrar el aparato, primero se coloca con cuidado los cables de los transductores, luego se colocan los transductores uno encima del otro y se enciende la máquina para que mande un impulso y se tiene que escuchar como cuando prende una chispa, esto quiere decir que está funcionando y ya está listo para usarse en el cilindro.

En la ilustración 3.17.2-2 Se coloca gel en el transductor para que cuando se coloquen en cada cara del cilindro exista un contacto total y se le pone gel porque es conductor y transmite perfectamente el impulso eléctrico.



Ilustración 3.17.2-3. Colocando el impulso eléctrico al cilindro

En la ilustración 3.17.2-3 se hace la prueba colocando el impulso después de calibrarlo y ponerle el gel a las caras, posteriormente se anota la lectura de la velocidad del pulso que marque.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se muestran los resultados de pruebas no destructivas y destructivas realizadas a cada una de las mezclas en especímenes cilíndricos y cúbicos.

4.1. Resultados de pruebas no destructivas y destructivas en cilindros

Los resultados de pruebas no destructivas, velocidad de pulso y resistividad eléctrica se muestran en las ilustraciones 4.1-1 a la 4.1-2, en ambas pruebas y para todas mezclas realizadas es posible apreciar una tendencia ascendente respecto a la edad. Esto es algo esperado, ya que las pruebas realizadas dependen de la porosidad del material analizado y en este caso la porosidad se va reduciendo al pasar el tiempo debido a la hidratación del cemento.

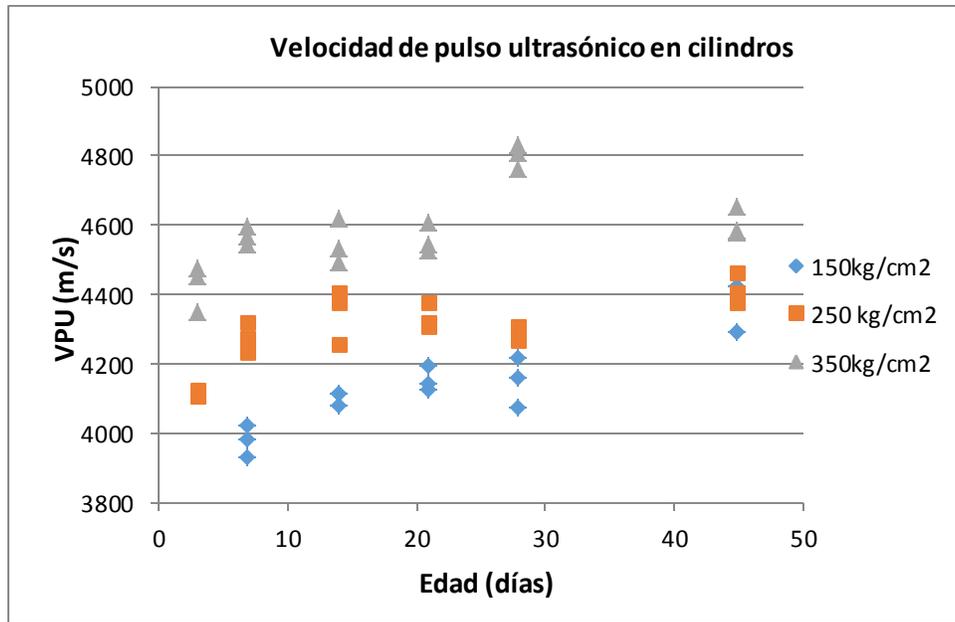


Ilustración 4.1-1 Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura

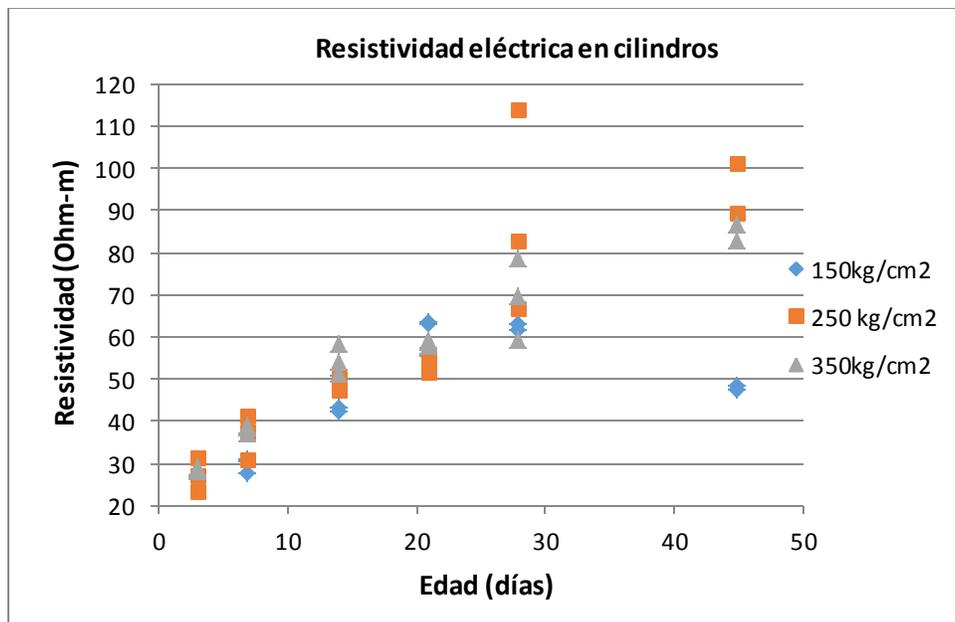


Ilustración 4.1-2. Resistividad eléctrica medida en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura

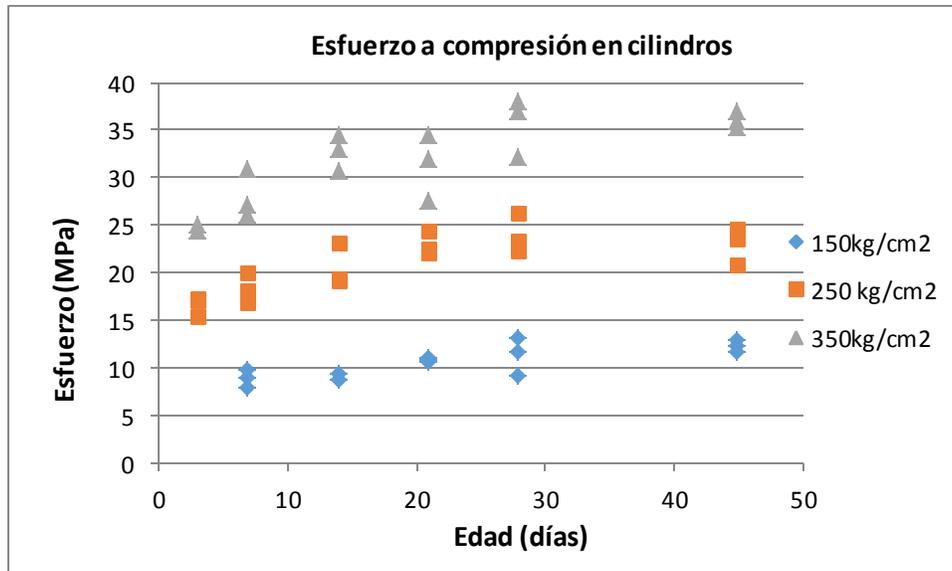


Ilustración 4.1-3. Esfuerzo a compresión en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura

Es bien sabido que la resistencia a la compresión del concreto hidráulico aumenta con el paso de los días por que la matriz se va densificando gracias a los productos de hidratación resultantes por la reacción del cemento, y en la ilustración 4.1-3 es posible apreciar esta tendencia ascendente y diferencia bien marcada para cada mezcla realizada.

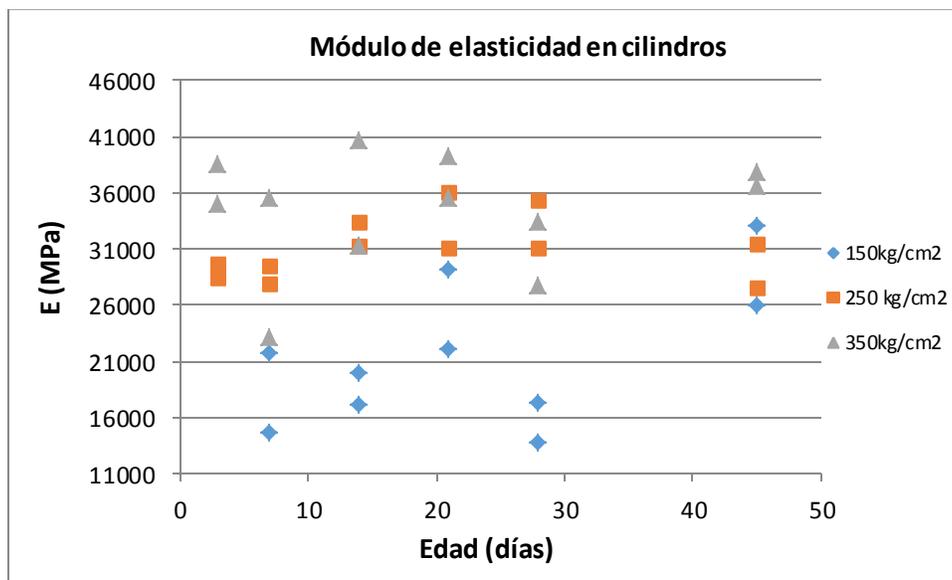


Ilustración 4.1-4. Módulos de elasticidad estáticos determinados en cilindros de 10cm de diámetro por 20cm de altura

En la ilustración 4.1-4 Se muestran los módulos de elasticidad estáticos obtenidos en muestras cilíndricas a las diferentes edades de prueba. Se presenta cierta dispersión en los resultados, sin embargo, se marca una diferencia entre las 3 mezclas probadas.

4.2. Resultados de pruebas no destructivas y destructivas en cubos

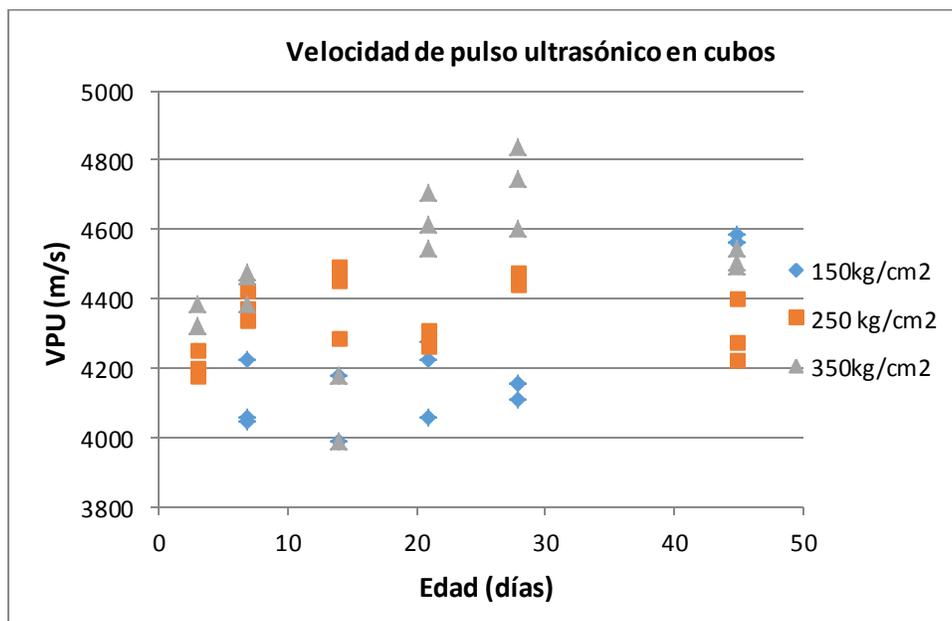


Ilustración 4.2-1. Velocidad de pulso ultrasónico medida en cubos de 15cm de lado

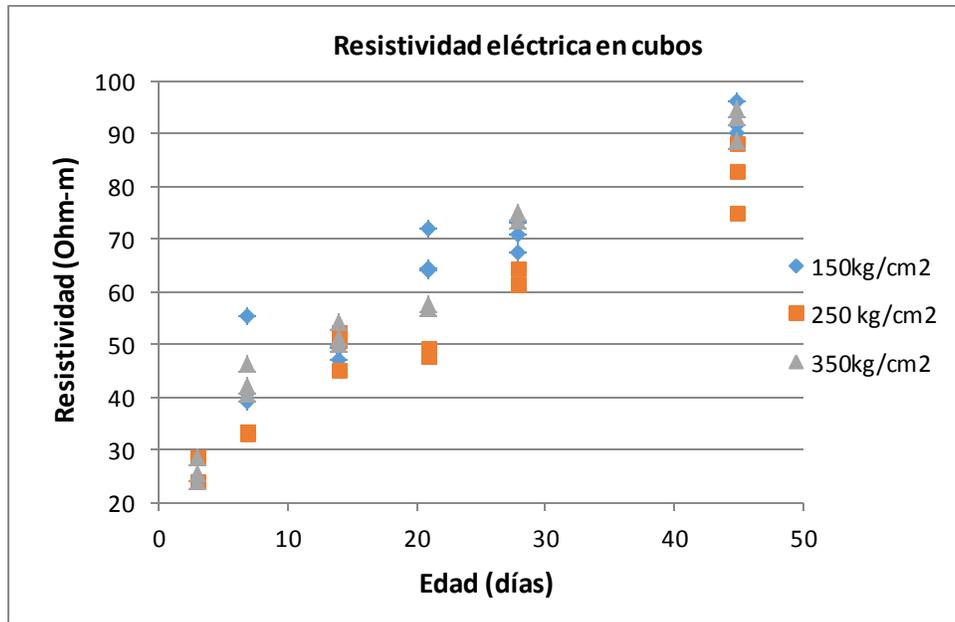


Ilustración 4.2-2. Resistividad eléctrica obtenida en cubos de 15cm de lado

En las ilustraciones 4.2-1 y 4.2-2, se muestran los resultados de pruebas no destructivas realizadas en cubos y se presenta una tendencia ascendente respecto al tiempo. El comportamiento es muy similar al presentado por los cilindros en el caso de pruebas no destructivas.

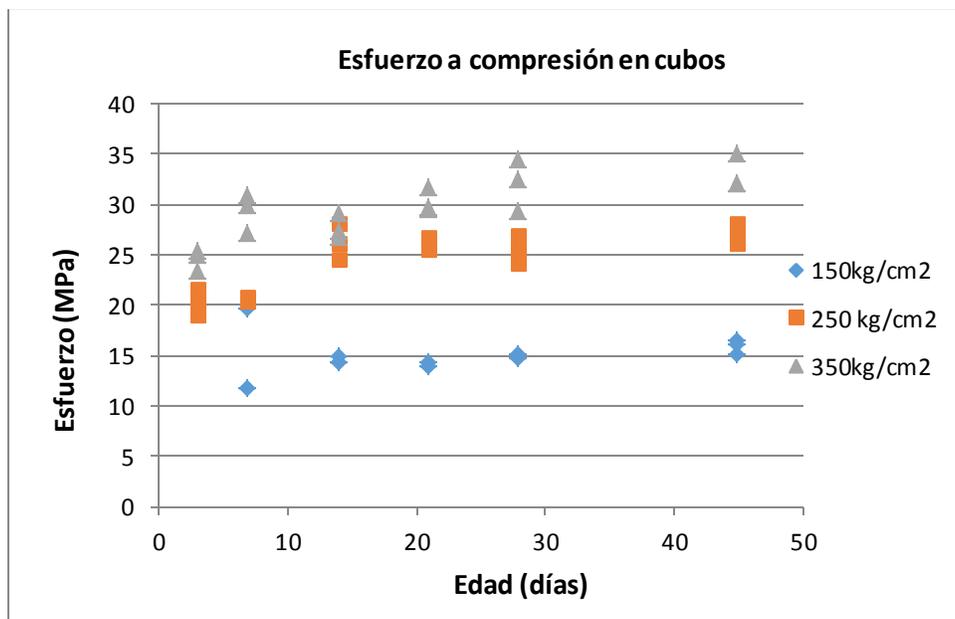


Ilustración 4.2-3. Resistencia a compresión obtenida en cubos de 15cm de lado

En el caso de las pruebas destructivas, ilustración 4.2-3, es notoria la diferencia entre las diferentes mezclas elaborada, además de una tendencia ascendente respecto a la edad.

El comportamiento en los resultados de pruebas no destructivas y destructivas para las muestras cilíndricas y cubicas es muy similar, sin embargo, los módulos de elasticidad estáticos solamente se realizaron en los cilindros y estos datos fueron empleados para obtener correlaciones mediante regresión lineal múltiple para poder determinar los módulos de elasticidad a partir de datos de muestras cubicas solamente.

4.3. Resultados de regresión lineal múltiple

En los primeros cálculos para obtener modelos se determinaron empleando todos los datos con los que se contaba de las pruebas tanto destructivas como no destructivas, ilustración 4.3-1 y se obtuvo la ecuación 20, que nos permite calcular el módulo de elasticidad con un factor de correlación de 0.7158.

ECU. [20]

$$E(MPa) = 6022.3 + 454 * edad(días) + 633.2 * esfuerzo cubos(MPa) - 342.8 * resistividad (ohms - m) + 4.3 * VPU(m/s)$$

$$R = 0.7158$$

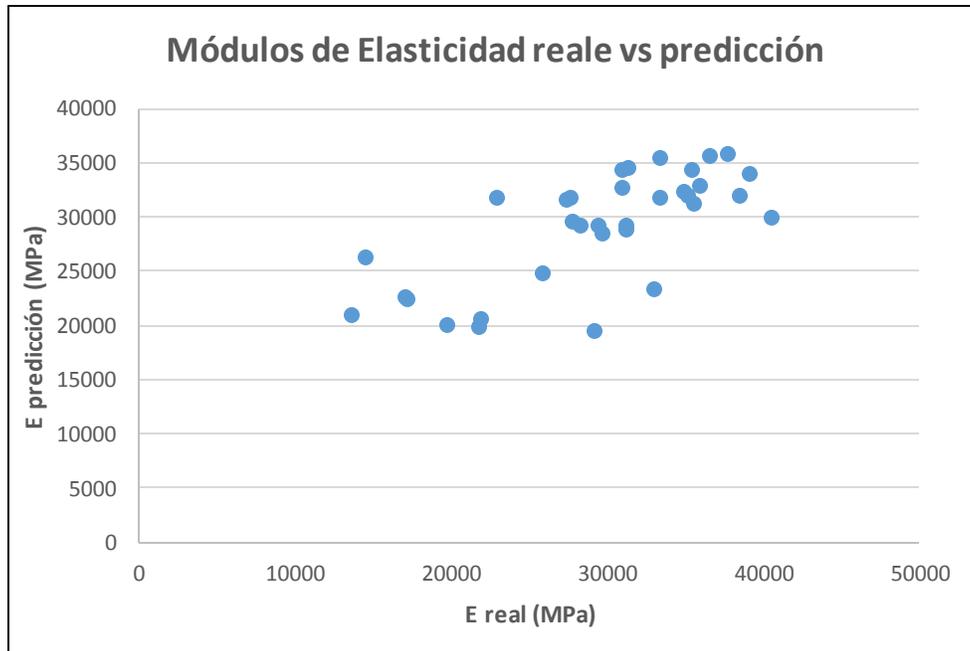


Ilustración 4.3-1. Predicciones obtenidas con todos los datos de pruebas no destructivas y destructivas.

Para mejorar la correlación obtenida se realizaron múltiples cálculos y se observó que eliminando los datos de las variables de entrada con mayor dispersión es posible mejorar el valor del coeficiente de correlación. La ilustración 4.3-2, muestra los valores obtenidos para el módulo de elasticidad estático eliminado los datos con mayor dispersión, obtenidos con la ecuación 21. Se pudo observar que, si se mejora la correlación, con un valor de $R = 0.8148$.

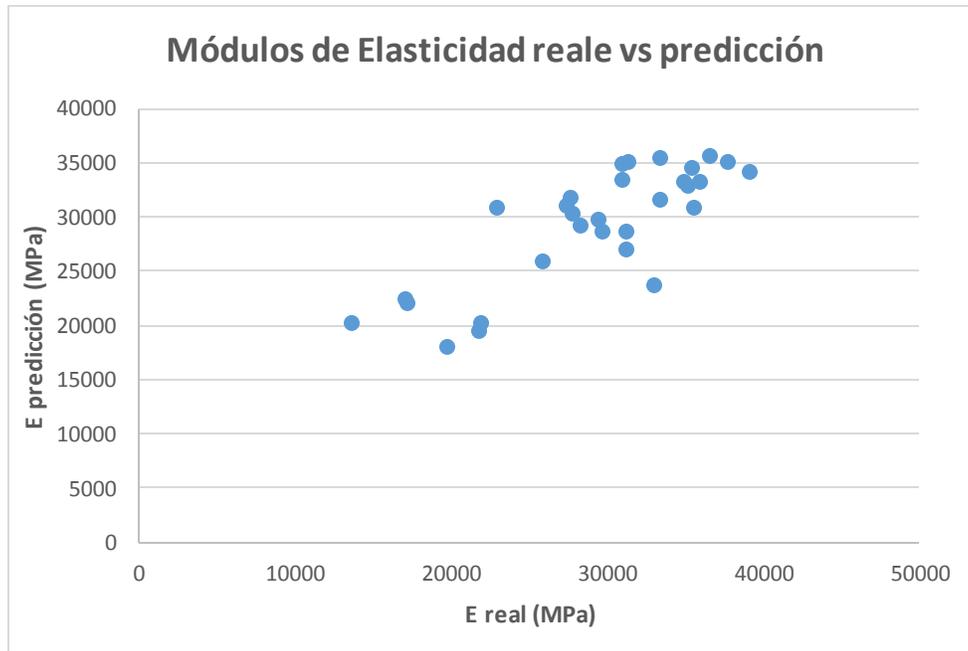


Ilustración 4.3-2. Módulos de elasticidad estáticos obtenidos con la ecuación 21.

ECU. [21]

Ecuación:

$$E(\text{MPa}) = -3037.7 + 592.3 * \text{edad}(\text{días}) + 570.9 * \text{esfuerzo cubos}(\text{MPa}) - 446.5 * \text{resistividad}(\text{ohm} - \text{m}) + 7.4 * \text{VPU}(\text{m/s})$$

$$R = 0.8148$$

Es importante mencionar que para reducir la dispersión en los resultados es indispensable realizar todo el proceso experimental con los procedimientos indicados por las normas al pie de la letra, repetir los procedimientos en la medida de lo posible bajo las mismas condiciones y de esta forma evitar introducir variables que afecten en los resultados. Ya que como se vio si reducimos la dispersión en los datos se mejoran las correlaciones.

4.4. Resultados de la Granulometría

En los cálculos para obtener los resultados se determinaron empleando todos los datos con los que se contaba de las pruebas de análisis granulométrico con las mallas, ilustración 4.4-1 y 4.4-2.

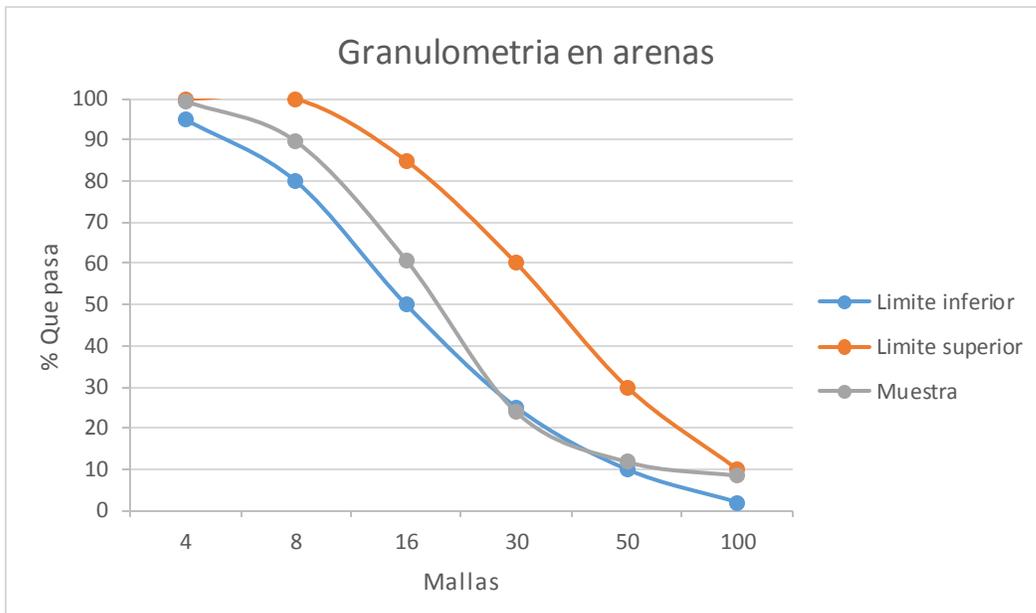


Ilustración 4.4-1

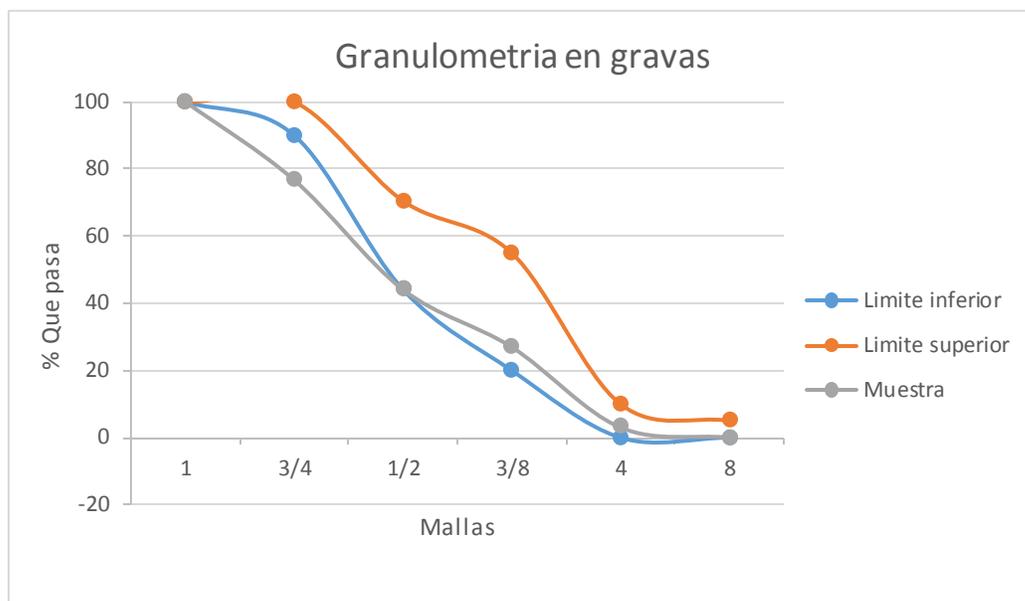


Ilustración 4.4-2

5. CONCLUSIONES

Después de analizados los resultados podemos llegar a mencionar las siguientes conclusiones:

La tendencia respecto al uso de las pruebas no destructivas esta en aumento cada día más y con la documentación del empleo, de los resultados y ventajas de las mismas podemos abonar al uso de las mismas.

Si dejáramos de usar cilindros de concreto para determinar el módulo de elasticidad nos ahorraríamos tiempo, material, mano de obra y dinero optimizando de esta forma los recursos. Pero también, seríamos amigables con el medio ambiente ya que al calentar azufre estamos emitiendo gases que nos obligan entre otras cosas a usar mascarillas durante el cabeceo de los cilindros.

Las normas vigentes proponen ecuaciones que relacionan al módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión del concreto obtenida a partir de cilindros, en este caso se proponen ecuaciones que permiten calcular el módulo de elasticidad a partir de la resistencia a la compresión obtenida en cubos de concreto, obteniendo factores de correlación del orden de 0.8148 para una ecuación que considera pruebas no destructivas, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, y pruebas destructivas como lo es la resistencia a la compresión obtenida en cubos.

La ecuación obtenida para el cálculo del módulo de elasticidad es para un concreto elaborado con materiales de la región, pero la metodología seguida en esta investigación puede repetirse para cualquier otro material y generar nuevas ecuaciones.

Es importante tener los cuidados indicados en los procedimientos de las pruebas de calidad para evitar errores posteriores en los resultados, ya que estos errores nos obligan a eliminar los datos con mayor dispersión lo que nos reduce datos para generar modelos de predicción.

6. BIBLIOGRAFIA

- ASTM C-597. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM Test Designation C-1231. (2001). *Test for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM Test Designation C-39. (2003). *Standardized Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylindrical Specimens*. Active Standard ASTM.
- ASTM Test Designation C-617. (2003). *Regulatory Practice for Pitching Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standard.
- ASTM-C-192M. (2018). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM-C-39M. (2018). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society of Testing Materials (ASTM).
- ASTM-C-469-02. (s.f.). *Static Module of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- Ávila, J., & Genescá, J. (2003). *Más allá de la Herrumbre II*. 3a Ed. La ciencia para todos, México, 48-81A.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades*.
- Kosmatka, H. (2004). *Diseño de control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association.
- Kumar, P., & Monteiro, P. (1998). *Concreto, estructura, propiedades y materiales*. Distrito Federal, Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Malhorta, V., & Carino, N. (2004). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. U.S.A: CRC Press, Boca Raton.
- Medina, E. (2007). *Construcción de estructuras de hormigón armado: edificación*. Madrid, España: Delta, Publicaciones Universitarias, 2da edición.
- Montero Granados, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*. España: Universidad de Granada.

- Neville, A. (1999). *Tecnología del concreto*. Distrito Federal, Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology*. England: Pearson.
- NMX C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción - Agregados - Masa Volumetrica - Metodo de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- NMX C-083. (2014). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- NMX C-109. (2013). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de Especímenes*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- NMX C-166-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- NMX C-170. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo al Tamaño Requerido para los Ensayos*. Ciudad de México: Normas Mexicanas.
- NMX-C-030-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- NORMA NMX C-111-ONNCCE. (2018). *Industria de la Construcción - Agregados para Concreto Hidráulico -Especificaciones y Métodos de Ensayo*. Ciudad de México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE).
- Olgún de la Mora, D. F. (2016). *Proceso de producción de agregados pétreos y su control de calidad*. CDMX: UNAM.
- Qixian, L., & Bungey, J. (1996). *Using compression wave ultrasonic transducer to measure the velocity surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete*. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, p.237.

Torres Acosta, A., Martínez Molina, W., Lomelí González, M., & Pérez Gallardo, A. (2010). *Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto, Publicación Técnica No. 328*. Querétaro, México.: Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.

Ward, S. (1980). *Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods*. Geophysics, Vol.45, pp. 1659-1666.

West Conshohocken. (s.f.). *Annual Book of ASTM Standards*.