

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**“IMPLEMENTACIÓN DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE
PROPIEDADES DEL CONCRETO CONVENCIONAL Y CON
MICROSÍLICE:
COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DESTRUCTIVOS Y NO
DESTRUCTIVOS”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTA:
Christian Karín Valenzuela Leyva**

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. Ramón Corral Higuera**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
Dr. Jesús Manuel Bernal Camacho**

Culiacán de Rosales, Sinaloa, noviembre de 2018.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REPOSITORIO INSTITUCIONAL



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de corazón a todas las personas que hicieron esto posible, desde el proceso de inscripción hasta el final del posgrado. Empiezo por darle las gracias a quien fue nuestra primera coordinadora del programa de Maestría, la **M.I. Magnolia Soto Félix**, quien me dio un trato increíblemente profesional desde el primer momento que me recibió en su oficina hasta el último día que tuve el gusto de saludarla en los pasillos de la Facultad de Ingeniería. Le deseo todo el éxito del mundo en su Doctorado.

Posteriormente durante el curso propedéutico tuve el gusto de volver a saludar después de tantos años a los profesores **M.I. Aureliano Castro** y **M.I. Luis Federico Sáinz López**, y la grata experiencia de conocer al profesor **M.I. Juan Carlos Galindo**.

En la entrevista el 30 de junio de 2016, me fue muy grato conocer al profesor **M.C.I. Sergio Rentería Guevara**, a quien le agradezco mucho por todas las veces que tuvo su tiempo para escucharme y comprenderme cada vez que coincidimos por los pasillos del área de posgrado. Ahí mismo durante la entrevista fue de mi gran agrado saludar de nuevo al **Dr. Fernando García Páez**, hoy nuestro Director de la Facultad quien tuve el honor de tenerlo como profesor en la Licenciatura y en esta Maestría, y también el de conocer por vez primera al **Dr. Ramón Corral Higuera** que en ese momento no me imaginaba con el nivel de persona que estaba tratando y hoy es uno de los profesionales con mayor influencia académica y profesional que he tenido en mis 36 años de vida. También agradecer al profesor **M.I. Jorge Hilario González Cuevas** que en ese momento era nuestro Director de la Facultad por todos sus mensajes positivos hacia todos los compañeros, durante el exhaustivo transcurso de los exámenes para el proceso de admisión al programa.

Agradecido para la eternidad con todos los profesores que tuve el honor de tener durante el posgrado, el cual fue un increíble grupo de profesionales que a pesar de sus agendas se dieron el tiempo de transmitirnos su experiencia y grandes conocimientos. Gracias especiales a todos mis profesores por nunca bajar el listón, sino siempre haberlo puesto muy alto para poderme estirar como profesional y como ingeniero, todo ese estrés y esas desveladas al final han valido mucho la pena. Para mencionar a todos los profesores, empiezo por el **Dr. Ramón Corral Higuera** que sin duda alguna es una de las mentes más brillantes que conozco y

después de impartirnos sus conocimientos en el aula se ganó por siempre todo mi respeto y admiración. Muchas gracias al **M.C.I. Alberto Burgueño Rendón**, quien al ser genio del emprendimiento tuve el placer de aprender tanto de él y con sus técnicas logré la formación de evaluar minuciosamente los proyectos desde el punto de vista económico. Agradecimiento al **M.C. Arturo Hernández Pérez** quien no sólo es un gran constructor sino un gran administrador e ingeniero civil, siendo él un claro ejemplo de cómo se puede lograr el éxito también a corta edad. Muchas gracias a la **Dra. Susana Cifuentes González** quien me mostró la importancia del aspecto sustentable en los proyectos de construcción para dejarle así un mundo mejor a nuestras próximas generaciones. Muy agradecido con el **M.C. José Alfredo Inzunza**, quien nos orientó en todo lo relacionado con la ingeniería legal y su gran importancia antes, durante y después de los proyectos de construcción. Gracias eternas al **Dr. Joel Gerardo Retamoza**, quien es una “biblioteca andante” de todo lo relacionado con el impacto ambiental y me dio muchísimo gusto de encontrármelo de nuevo como mi profesor después de todo el tiempo transcurrido desde la Licenciatura. También muchas gracias por sus clases y su paciencia al **Dr. Fernando García Páez**, quien no sólo es un ingeniero muy reconocido en nuestra ciudad sino también un profesor muy reconocido en nuestra universidad. También un gran placer haber tenido el gusto de que el **M.I. Ismael Rodríguez Vázquez** haya compartido en el aula sus grandes conocimientos de la ingeniería geotécnica y así aprovechar su gran experiencia no sólo como el gran geotecnista que es, sino también un excelente ingeniero civil. Un agradecimiento muy especial a nuestra actual coordinadora del programa, la **M.I. Alejandra Brambila Mendivil**, por tener de su parte todo el apoyo posible y con su gran actitud profesional en todo momento estuvo al pendiente de todos los requerimientos para que este posgrado cumpliera con las exigencias que exige la ingeniería actual.

Les agradezco a todos mis compañeros con quien cursé esta Maestría, los cuales considero unas mentes brillantes y de quienes aprendí mucho, fue un placer haber compartido tantas bonitas experiencias que nos quedarán para toda la vida. Muchas gracias al arquitecto **Luis Alfonso Gurrola Camero**, a los ingenieros **Luisa Alfaro Valencia**, **Adam Alexander Mendoza Lizárraga**, **Genaro Bueno León**, **Jesús Eduardo Ceceña Osuna**, **Eric Adrián Martínez Jiménez**, **Eliseo Uriarte Vargas**, **Jesús Leyva López** y un agradecimiento muy especial a los ingenieros **Alfonso Mirsha Aragón Ayala** y **Brando Israel Vázquez**

Heredia. A cada uno de ustedes y sus familias les deseo una vida llena de salud, así como toda la suerte y éxito del mundo. Espero no perdamos el contacto y volverlos a encontrar más adelante en el tren de la vida.

Agradezco mucho también a la **Dra. Susana Paola Arredondo Rea**, al **Dr. Fernando García Páez** y al **Dr. Manuel de Jesús Pellegrini Cervantes**, por su paciencia al evaluarme durante mi avance de proyecto de intervención. Sus observaciones y recomendaciones fueron de vital importancia para mí y me ayudaron mucho a desarrollar este proyecto.

Muchas gracias al técnico laboratorista **Irineo Rivera** y a los ingenieros **José Ángel Raygoza** y **Roberto Madrigal** por su apoyo en la elaboración de las mezclas de concreto para este proyecto. Muy agradecido también con mi gran amigo **Francisco Javier Ponce Nájar**, por ayudarme a desarrollar la aplicación en Android para el proyecto de intervención.

Imposible olvidar la grandísima experiencia que cambió mi forma de ver la vida y mi manera de pensar, el haber desarrollado una estancia de investigación para el proyecto de intervención en la UPC en Barcelona, España. Eternamente agradecido al **Dr. Ramón Corral** por contactarme con el **Dr. José Manuel Gómez Soberón**, quien se portó excelente conmigo, me recibió en la UPC y me brindó todas las facilidades posibles para aprender tantas cosas nuevas e increíbles. Muchas gracias a los futuros Doctores en Ingeniería **Héctor Saldaña** y su esposa **Diana**, así como a mi gran amigo **Francisco Sanhueza** con quienes compartí esta bonita experiencia. Espero tomarle la palabra al **Dr. Gómez Soberón** y regresar algún día a trabajar en otro proyecto.

También agradezco a todos mis amigos, familiares, compañeros de trabajo y a mis clientes que tengo el gusto y satisfacción de prestarles servicios profesionales, por todo su apoyo y buenas vibras durante mis estudios de esta Maestría. Gracias, totales.

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios por todo lo que me ha dado y poner las personas indicadas siempre en mi camino. Señor Padre, sabes bien por todo lo que he pasado para llegar hasta aquí.

Le dedico este proyecto de intervención con mucho cariño primeramente a las personas que forman parte de él. Muchas gracias a mi Co-director el **Dr. Jesús Manuel Bernal Camacho**, por todo su apoyo durante la realización de este proyecto. Gracias por recibirme en su laboratorio en días y horas a veces no ideales, le estaré siempre agradecido por toda su profesionalidad y compartir conmigo todos sus grandes conocimientos.

De manera muy especial, le dedico este trabajo final al Director de este proyecto el **Dr. Ramón Corral Higuera**, a quien no tengo palabras para describirlo. Sólo con el hecho de habérmelo cruzado en mi camino como profesor cambió mi vida y me hizo un mejor ingeniero. Con toda seguridad puedo decirle que, gracias a personas como usted, todavía existe una esperanza para que las próximas generaciones sean cada vez mejor. Muchas gracias por todo Doctor, por favor tenga presente que tendrá por siempre mi más sincera amistad incondicional. Espero de todo corazón que un futuro podamos volver a trabajar juntos en otros proyectos.

Muchas gracias a mis suegros, el **Ing. Eustorgio Silva** y la **Sra. Beatriz Cervantes** por sus buenas vibras y todo su gran apoyo durante mis estudios de posgrado, también a mis cuñadas **Mayra** y **Aleyda Silva** por todos sus buenos deseos.

Por último, le dedico este proyecto final para tener el grado de Maestro en Ingeniería a las personas más importantes de mi vida. Sin ellos para mi nada sería igual.

A mis hermanas **Marla** y **Ziara**, y a mi pequeño sobrino **Luis Roberto** los quiero mucho. Esas dos niñas que vi nacer y crecer hasta que se convirtieron en buenas mujeres y grandes personas con quienes he vivido tantas cosas y ahora mi sobrino que llegó a este mundo hace poco, les dedico esto con mucho cariño.

A mis hijas **Alison** y **Victoria Sofía**, que en este momento son muy pequeñas para comprender la magnitud de lo que significan para mí al ser ustedes el centro de donde da vueltas mi vida, son mi mayor motivación para ser un mejor ingeniero y mejor persona, las

amo a las dos con toda mi alma. Soy consciente de que aún todavía me quedan muchas cosas por aprender y mejorar, por ello en lo que me resta de vida haré todo lo que esté a mi alcance para ser un ejemplo para ustedes, no descansaré ni me detendré hasta formarlas como personas de producción y de bien para nuestra sociedad. Durante todas sus etapas de la vida, les enseñaré poco a poco el por qué no existe un secreto para el éxito y el único camino a seguir es el del trabajo duro, el de la honestidad, la humildad y la confianza en uno mismo.

A mi esposa **Eyra Beatriz**, quien siempre será esa niña de 19 años de quien me enamoré por dedicación a sus estudios y por la forma en que ves la vida. No sabes cuánto le agradezco a Dios que te haya puesto en mi camino, llegaste a transformar mi vida cuando era un solo un joven que tenía sueños, pero a veces no encontraba el rumbo ni el sentido de mi existencia. De tu mano todo ha sido para mí mucho más fácil. Sin tu apoyo esto no hubiera sido posible, gracias por tu comprensión en esas noches que te quedaste dormida esperándome por estar haciendo mis trabajos e investigaciones, gracias por esos días que tuviste que ser padre y madre algunas veces en mi ausencia, gracias por ser siempre mi compañera y amiga y gracias por darme a mis hijas que son lo que más quiero. Gracias por estos 17 años junto a mí. Te amo.

Y una dedicatoria muy especial a mis padres, **María del Rosario** y **Roberto**. Gracias por todo su apoyo desde siempre y por ser mi mayor inspiración y ejemplo.

A ti mamá por ser mi consejera, por enseñarme cómo tratar a las personas, me enseñaste a no rendirme jamás, te admiro mucho por todo lo que eres. Los pretextos no existen para ti, siempre logras lo que te propones. Gracias por todas tus enseñanzas y por ser un ejemplo de cómo debemos ser como personas. Observándote, aprendí cómo un hombre debe tratar una mujer y eso me enseñó a ser un mejor esposo y un mejor padre de mis dos hijas. Durante el curso de este posgrado siempre me preguntaste cómo me sentía, siempre me entendiste y comprendiste mi estrés, a veces tus palabras de aliento eran lo que me motivaban a seguir avanzando y no mirar atrás. Tu ejemplo como la gran profesional que eres, el verte estudiar tus posgrados teniendo la responsabilidad de criar tres hijos y hacer todo a la vez, me sirvió mucho de inspiración para no dar ningún pretexto. Te dedico este logro con todo mi corazón, te amo mamá.

Y a ti papá, que desde siempre somos un equipo y desde que tengo uso de razón siempre he seguido tu ejemplo. Sólo tú y yo sabemos por las cosas que hemos pasado y todo lo que hemos vivido juntos en esta increíble profesión de la Ingeniería Civil. Por todo el amor que siento por ti, ha sido un placer para mí haber podido crecer a tu lado, y es un placer hoy poder tener la oportunidad de envejecer junto a ti. Siempre mejorando, siempre aprendiendo cosas más, siempre motivándome a ser mejor, siempre exigiéndome, cómo te agradezco por todos los consejos que me has dado. Recuerdo como si fuera ayer cuando era un solo un niño de cuatro años que rayaba tu escritorio y tus libros de ingeniería, me acuerdo cuando te acompañaba a la universidad y me pedías que me quedara quieto y no me moviera de tu cubículo, pero al darte la vuelta iba a verte desde lejos cómo impartías tus clases. Gracias a ti crecí entre las obras de construcción, recuerdo de pequeño cómo me gustaba acompañarte a tu trabajo, no me detenía ni el sol ni el calor y cuando viajábamos te hacía mil preguntas de los caminos y carreteras hasta que llegábamos a nuestro destino, las cuales siempre me contestabas con gusto. Por todo esto, crecí soñando en que un día sería como tú un gran Ingeniero Civil y hoy en día ejercer esta carrera se ha convertido a nivel profesional en mi mayor pasión, gracias por enseñarme con tu ejemplo a ser un buen hombre y un buen ingeniero. Al ser mi mayor inspiración en esta profesión Tú eres la persona más especial a quien le pueda esto dedicar. ESTO VA PARA TI, PAPÁ.

“Vive como si fueras a morir mañana. Aprende como si fueses a vivir para siempre”.

Mahatma Gandhi.

RESUMEN

En este trabajo experimental se determinaron los principales indicadores de resistencia y durabilidad de mezclas de concreto convencional y concreto con microsílice para diferentes relaciones agua – material cementante. Se utilizaron métodos destructivos y no destructivos para la determinación de los indicadores. Con los resultados se confeccionaron diagramas de interacción para dos y tres variables por medio de los cuales se encontraron buenas correlaciones entre propiedades y entre métodos.

ABSTRACT.

In this experimental work the main indicators of resistance and durability of mixtures of conventional concrete and concrete with microsilica for different relations water – cementitious material were determined. Destructive and non-destructive methods were used to determine the indicators. With the results, interaction diagrams were made for two and three variables by means of which good correlations between properties and between methods were found.

PALABRAS CLAVE

CONCRETO, DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN, MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS, MICROSÍLICE, DURABILIDAD.

ÍNDICE.

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	PRESENTACIÓN.....	1
1.1.1.1.	DISEÑO Y PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO.	1
1.1.1.2.	ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.....	1
1.1.1.3.	ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO.....	2
1.1.1.4.	DESARROLLO DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN.....	3
1.1.1.5.	MICROSÍLICE.....	3
1.1.2.	MISIÓN.....	3
1.1.3.	VISIÓN.....	3
1.2.	ANÁLISIS SITUACIONAL.....	4
1.3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO.....	6
1.3.1.	CAUSAS.....	6
1.3.2.	CONSECUENCIAS DEL PROBLEMA.....	8
2.	FUNDAMENTO TEÓRICO.....	9
2.1.	MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL.....	9
2.1.1.	CEMENTO Y CONCRETO.....	9
2.1.2.	MICROSÍLICE.....	11
2.1.3.	DURABILIDAD.....	12
2.1.1.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	14
2.2.	ESTADO DEL ARTE.....	16
2.3.	MARCO TEÓRICO.....	24
2.3.1.	CEMENTO.....	24
2.3.2.	CONCRETO.....	27
2.3.3.	MICROSÍLICE.....	31
2.3.4.	DURABILIDAD.....	38
2.3.5.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	44
2.4.	MARCO LEGAL.....	48
3.	PROYECTO DE INTERVENCIÓN.....	49

3.1.	OBJETIVOS GENERALES.....	49
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	50
3.3.	JUSTIFICACIÓN.....	50
3.4.	METODOLOGÍA.....	51
3.4.1.	DISEÑO Y PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO.	51
3.4.1.1.	ELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA.	52
3.4.2.	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DE PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.....	74
3.4.2.1.	DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO.	74
3.4.2.2.	MUESTREO DE AGREGADOS.....	76
3.4.2.3.	REDUCCIÓN DE LA MUESTRAS DE AGREGADOS OBTENIDAS EN EL CAMPO AL TAMAÑO REQUERIDO PARA LAS PRUEBAS.....	77
3.4.2.4.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS.	79
3.4.2.5.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO.	80
3.4.2.6.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO.....	81
3.4.2.7.	DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS....	83
3.4.2.8.	CONTENIDO DE AGUA EN AGREGADOS POR SECADO.....	84
3.4.3.	MEZCLADO DEL CONCRETO.....	85
3.4.3.1.	TIEMPO DE MEZCLADO.	85
3.4.3.2.	ESPECIFICACIONES DEL AGUA PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO.	87
3.4.4.	ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.....	89
3.4.4.1.	DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO.	89
3.4.4.2.	DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA.....	91
3.4.5.	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.	92
3.4.5.1.	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REBOTE MEDIANTE ESCLERÓMETRO.	92
3.4.5.2.	DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL TRANSVERSAL.	93
3.4.5.3.	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO.....	95

3.4.5.4.	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO (MÉTODO DE ULTRASONIDO).....	96
3.4.5.5.	MIGRACIÓN DE CLORUROS.....	98
3.4.6.	ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.....	98
3.4.6.1.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	98
3.4.6.2.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS TERCIOS DEL CLARO. 99	
3.4.6.3.	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON.....	100
3.4.6.4.	DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y VACÍOS. 103	
3.4.7.	OTROS PROCEDIMIENTOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS DEL CONCRETO.	106
3.4.7.1.	MUESTREO DEL CONCRETO FRESCO.	106
3.4.7.2.	ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO.	107
3.4.7.3.	CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE GABINETES, CUARTOS HÚMEDOS Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO PARA CONCRETOS HIDRÁULICOS.....	108
3.4.7.4.	CABECEO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.....	109
3.4.7.5.	USO DE CASQUETES NO ADHERIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO.	110
3.4.7.6.	DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS.	111
3.5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	112
3.5.1.	PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.	112
3.5.1.1.	MÉTODO DEL VOLUMEN ABSOLUTO.	112
3.5.2.	RESULTADOS DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DEL CONCRETO FRESCO. 119	
3.5.2.1.	TEMPERATURA.....	119
3.5.2.2.	REVENIMIENTO.....	120
3.5.3.	RESULTADOS DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DEL CONCRETO ENDURECIDO.....	121

3.5.3.1.	PESO VOLUMÉTRICO.....	121
3.5.3.2.	RESULTADOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	121
3.5.3.3.	RESULTADOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	130
3.5.4.	DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN TRIPLES PARA CORRELACIONAR PROPIEDADES.	140
4.	ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN.....	148
4.1.	PLAN DE ACCIÓN.	148
4.2.	ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO.....	154
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	155
5.1.	CONCLUSIONES	155
5.2.	RECOMENDACIONES.....	156
6.	REFERENCIAS DOCUMENTALES Y BIBLIOGRAFÍA.....	157
6.1.	REFERENCIAS DOCUMENTALES.....	157
7.	ANEXOS.....	163
7.1.	ANEXO 1. Diagramas triples de interacción no presentados en sección de resultados.	163

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 – Ciudades con más rascacielos (12 niveles o más de 35 m de altura) y edificios en el mundo (con más de 20 m de altura).	5
Tabla 2 - Fuentes de las materias primas usadas y la fabricación del cemento Portland.	25
Tabla 3 - Compuestos principales del cemento portland.	27
Tabla 4 - Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto usando los métodos directo y de Wenner (en medios finitos).....	46
Tabla 5 – Criterio de referencia para los parámetros de velocidad de pulso en el concreto.	47
Tabla 6 - Relación agua - material cementante máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición.....	54
Tabla 7 - Requisitos para el concreto expuesto a los sulfatos del suelo y del agua.	55
Tabla 8 - Dependencia entre la relación agua - material cementante y la resistencia a la compresión del concreto. La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo por 28 días. La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm.....	56
Tabla 9 - Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto. Los volúmenes se basan en agregados varillados en seco.	59
Tabla 10 - Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción (Se puede aumentar 25 mm para los métodos de consolidación manuales, tales como varillado o picado. Los plastificantes pueden proveer revenimientos mayores).....	61
Tabla 11 - Requisitos mínimos de material cementante para concreto usado en superficies planas. Las cantidades de material cementante tal vez tengan que aumentarse en la exposición severa. Por ejemplo, en el caso de exposición a descongelantes, el concreto debe contener por lo menos 335 kg/m ³ de material cementante.....	63
Tabla 12 - Requisitos de materiales cementantes para concreto expuesto a descongelantes.	65
Tabla 13 - Contenidos máximos de Iones Cloruros para la protección contra la corrosión.....	66
Tabla 14 - Factor de corrección para la desviación estándar cuando están disponibles menos de 30 ensayos.	68
Tabla 15 - Resistencia a compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para establecer desviación estándar.	69
Tabla 16 - Densidad del agua versus temperatura.....	74
Tabla 17 – Masa mínima de la muestra.....	77
Tabla 18 – Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas.....	87
Tabla 19 - Valor nominal del revenimiento y tolerancias.	90

Tabla 20 - Temperaturas de concreto recomendadas durante climas fríos según ACI 306.	92
Tabla 21 - Tipos de elemento y resistividad eléctrica	95
Tabla 22 - Matriz de experimentación para el primer grupo de mezclas.	112
Tabla 23 - Matriz de experimentación para el segundo grupo de mezclas.....	113
Tabla 24 - Especificaciones y tolerancias de componentes del cemento CPC 30R en México.	114
Tabla 25 - Proporciones de la mezcla con un metro cúbico de concreto según el diseño de proporcionamiento.	119
Tabla 26 – Resultados de temperatura de las mezclas de concreto fresco.	119
Tabla 27 - Parámetros de revenimiento para las mezclas de concreto fresco.	120
Tabla 28 - Peso volumétrico a 28 días de las mezclas de concreto.....	121
Tabla 29 - Resultados de resistencia a la compresión a 28 días de edad.....	122
Tabla 30 - Resultados de resistencia a la flexión a 28 días de edad.....	124
Tabla 31 - Resultados de módulo de elasticidad estático a 28 días de edad.	126
Tabla 32 - Resultados de volumen de poros permeables a 28 días de edad.....	128
Tabla 33 - Resultados de número de rebote a 28 días de edad.....	130
Tabla 34 - Resultados de módulo de elasticidad dinámico a partir de la frecuencia fundamental transversal del concreto a 28 días.....	131
Tabla 35 - Resultados de velocidad de pulso a 28 días de edad.....	134
Tabla 36 - Resultados de resistividad eléctrica a 28 días de edad.....	136
Tabla 37 - Resultados de migración de cloruros a 28 días de edad.....	138
Tabla 38 - Comportamiento de las propiedades del concreto en estudio a menor relación agua - cemento.	147

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1 – Variación de las proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto. Las barras 1 y 2 representan mezclas ricas con agregados de pequeño tamaño. Las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes.....	28
Figura 2 - Esquematización de la microestructura del concreto.....	30
Figura 3 - Microestructura del concreto convencional.....	31
Figura 4 - Microestructura de concreto con microsílíce.....	34
Figura 5 - Influencia de la relación agua - cemento en la porosidad capilar del concreto.	40
Figura 6 - Influencia del tamaño de las partículas en la porosidad capilar.	40
Figura 7 - Representación del "efecto pared" en el concreto	42

Figura 8 - Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua - material cementante para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19mm a 25 mm (3/4 a 1 pulg.). La resistencia se basa en cilindros curados por 28 días en ambiente húmedo	56
Figura 9 - Volumen del agregado grueso por unidad de volumen de concreto. Los volúmenes se basan en agregados en la condición varillados en seco.	59
Figura 10 - Demanda de agua aproximada para varios revenimientos y tamaños de agregados triturados para concreto sin aire incluido (izquierda) y concreto con aire incluido (derecha).	62
Figura 11 - Cuarteo manual.....	78
Figura 12 - Efecto del tiempo en la resistencia del concreto y su variación.	86
Figura 13 - Distribución granulométrica del agregado grueso.....	115
Figura 14 - Distribución granulométrica del agregado fino.	116
Figura 15 – Diagrama de interacción de los resultados de la resistencia a la compresión del concreto a 28 días de las mezclas en estudio.	123
Figura 16 - Diagrama de interacción de los resultados de la resistencia a la flexión del concreto a 28 días de las mezclas en estudio.	125
Figura 17 - Diagrama de interacción de los resultados de módulo de elasticidad estático del concreto a 28 días para las mezclas en estudio.	127
Figura 18 - Diagrama de interacción de los resultados de volumen de poros permeables en el concreto a 28 días para las mezclas en estudio.	129
Figura 19 - Diagrama de interacción de los resultados de número de rebote del concreto a 28 días de las mezclas en estudio.	131
Figura 20 - Diagrama de interacción de los resultados de módulo de elasticidad dinámico a partir de la frecuencia fundamental transversal del concreto a 28 días.	133
Figura 21 - Diagrama de interacción de los resultados de velocidad de pulso a 28 días.	135
Figura 22 - Diagrama de interacción de los resultados de resistividad eléctrica a 28 días.	137
Figura 23 - Diagrama de interacción de los resultados de migración de cloruros a 28 días.	139
Figura 24 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y flexión a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	140
Figura 25 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad estático a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	141
Figura 26 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y el volumen de poros permeables a 28 días, en función de la relación agua - material cementante. ...	142
Figura 27 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	143

Figura 28 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	144
Figura 29 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	145
Figura 30 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	146
Figura 31 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y velocidad de pulso a 28 días, en función de la resistencia a la compresión.	147
Figura 32 - Captura de pantalla inicial de la aplicación.	149
Figura 33 - Captura de pantalla de la segunda vista (pestaña uno).	150
Figura 34 - Captura de pantalla de la tercera vista (pestaña dos).	151
Figura 35 - Captura de pantalla de la cuarta vista (pestaña tres).	151
Figura 36 - Captura de pantalla de la quinta vista (pestaña cuatro).	152
Figura 37 - Captura de pantalla de la sexta vista (pestaña cinco).	153
Figura 38 - Última captura de pantalla.	154
Figura 39 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	163
Figura 40 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	164
Figura 41 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	164
Figura 42 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	165
Figura 43 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad estático a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	165
Figura 44 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y el volumen de poros permeables a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	166
Figura 45 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	166
Figura 46 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	167

Figura 47 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	167
Figura 48 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	168
Figura 49 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.....	168
Figura 50 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y volumen de poros permeables a 28 días, en función de la relación agua - material cementante. ...	169
Figura 51 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	169
Figura 52 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	170
Figura 53 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	170
Figura 54 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	171
Figura 55 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	171
Figura 56 - Diagrama triple de interacción para volumen de poros permeables y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.....	172
Figura 57 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	172
Figura 58 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	173
Figura 59 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	173
Figura 60 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	174
Figura 61 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	174
Figura 62 - Diagrama triple de interacción para correlacionar velocidad de pulso y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	175

Figura 63 - Diagrama triple de interacción para correlacionar velocidad de pulso y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	175
Figura 64 - Diagrama triple de interacción para correlacionar velocidad de pulso y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.....	176
Figura 65 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad dinámico y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	176
Figura 66 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad dinámico y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	177
Figura 67 - Diagrama triple de interacción para correlacionar coeficiente de migración de cloruros y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.	177
Figura 68 - Diagrama triple de interacción para correlacionar coeficiente de migración de cloruros y resistividad eléctrica a 28 días, en función del volumen de poros permeables.	178

ABREVIATURAS.

CPC: Cemento portland compuesto.

MS: Microsílice.

CH: Portlandita.

C-S-H: Gel de silicato cálcico hidratado.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. PRESENTACIÓN.

En este proyecto se compararon mediante métodos destructivos y no destructivos las propiedades del concreto convencional y con microsílice en estado endurecido. Con ello, se pretende contribuir en la industria de la construcción en algunos factores como:

- Demostrar que con los métodos no destructivos es posible reducir tiempo y costo en dictámenes de inspección y mantenimiento en obras de ingeniería.
- La aplicación adecuada de los métodos no destructivos en la recopilación de datos para la Ingeniería Forense.
- Difundir las propiedades de durabilidad del concreto con microsílice y simultáneamente, su aportación al factor ambiental al aprovechar un residuo.

Como resultado, se desarrollaron diagramas triples de interacción de las propiedades del concreto mediante la comparativa de métodos destructivos y no destructivos tanto en concreto convencional y concreto con microsílice.

1.1.1.1. DISEÑO Y PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO.

Como primer paso, se realizaron los diseños de proporcionamiento de mezclas de concreto para las matrices de experimentación de dos grupos de mezclas, una para concreto convencional y la otra para concreto con microsílice. El método que se utilizó para estos diseños de proporcionamiento fue el del “volumen absoluto” y su procedimiento se detalla paso a paso. También se describe cómo determinar todos los parámetros requeridos para el diseño de proporcionamiento de las mezclas de concreto.

1.1.1.2. ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.

Posteriormente, se determinaron las propiedades al concreto fresco de las mezclas de concreto elaboradas con las especificaciones de los diseños de proporcionamiento, mediante los ensayos de revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE-2010) y temperatura (NMX-C-435-ONNCCE-2004) para verificar su calidad en estado fresco. Simultáneamente, se tomaron muestras al concreto (NMX-C-161-ONNCCE-2013) en probetas cilíndricas y vigas.

1.1.1.3. ENSAYOS AL CONCRETO ENDURECIDO.

Las probetas de concreto endurecido se sometieron a un proceso de curado (NMX-C-159-ONNCCE-2016), se cabecearon antes de su ensaye (NMX-C-109-ONNCCE-2013 y NMX-C-469-ONNCCE-2013) y posteriormente se desarrollaron los ensayos destructivos y no destructivos a las edades de 7, 14 y 28 días.

1.1.1.3.1. MÉTODOS DINÁMICOS (ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS).

Los ensayos no destructivos fueron los primeros que se realizaron, ya que no generan daño alguno a las muestras de concreto endurecido. Los métodos dinámicos (ensayos no destructivos) permitieron obtener características tanto cuantitativas, como cualitativas. El cuerpo de prueba no queda inutilizable después del ensayo, por lo tanto, se puede emplear en sus funciones normalmente o después de su ensayo muchas otras veces. Los ensayos no destructivos que se desarrollaron son los siguientes:

- Determinación del número de rebote mediante esclerómetro (NMX-C-192-ONNCCE-2006).
- Frecuencia fundamental transversal de especímenes de concreto (módulo dinámico de Young) (NMX-C-089-1997-ONNCCE).
- Velocidad de pulso por el método de ultrasonido (NMX-C-275-ONNCCE-2004).
- Resistividad eléctrica (NMX-C-514-ONNCCE-2016).
- Determinación del coeficiente de difusión de cloruros (NT BUILD 492).

1.1.1.3.2. MÉTODOS ESTÁTICOS (ENSAYOS DESTRUCTIVOS).

Posterior a los ensayos no destructivos se realizaron los ensayos destructivos. Los métodos estáticos que se realizaron mediante ensayos mecánicos destructivos dejaron las probetas de concreto endurecido inutilizables después de la realización del ensayo. Los métodos estáticos que se utilizaron en esta investigación son los siguientes:

- Resistencia a la compresión (NMX-C-083-ONNCCE-2014).
- Resistencia a la flexión (NMX-C-191-ONNCCE-2015).
- Masa específica, absorción y vacíos (NMX-C-263-ONNCCE-2010).
- Módulo de elasticidad estático (NMX-C-128-ONNCCE-2013).

1.1.1.4. DESARROLLO DE DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN.

Después de obtener los resultados de los ensayos al concreto endurecido de todos los métodos dinámicos y estáticos, se procedió al desarrollo de los diagramas de interacción de las propiedades del concreto convencional y con microsílice.

1.1.1.5. MICROSÍLICE.

En esta investigación, se utilizó microsílice en el segundo grupo de mezclas de concreto (sustitución del 10% de microsílice por cemento en relación 1:1 en peso) y se estudiaron sus propiedades en el concreto fresco y endurecido.

1.1.2. MISIÓN.

Contribuir a la sustentabilidad de la industria de la construcción mediante la reducción del tiempo y costo de los dictámenes en Control de calidad, Ingeniería Estructural y recopilación de datos para la Ingeniería Forense, y mediante la difusión en México de la utilización del microsílice en el concreto para aprovechar sus aportaciones a la durabilidad del concreto, y aportaciones a la mitigación del impacto ambiental por disposición de residuos industriales.

1.1.3. VISIÓN.

Mejorar los servicios de Control de calidad, Ingeniería Estructural e Ingeniería Forense en estructuras de concreto, promoviendo la utilización de ensayos no destructivos y difundir en la Industria de la Construcción las propiedades de durabilidad del concreto con microsílice.

1.2. ANÁLISIS SITUACIONAL.

a. Ubicación organizacional.

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.

En nuestro país, se ha estado impulsando el desarrollo de los métodos no destructivos en el concreto, un ejemplo es el laboratorio de materiales del IMCYC (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto). En la actualidad, éste presta los servicios a la industria de la construcción de algunos ensayos por métodos no destructivos siguiendo la siguiente normativa:

- Conductividad o resistividad eléctrica a través de cilindros de concreto (ASTM C1760).
- Determinación del coeficiente de difusión de cloruros (NT BUILD 492).
- Determinación del número de rebote mediante esclerómetro (NMX-C-192-ONNCCE-2006).
- Velocidad de pulso por el método de ultrasonido (NMX-C-275-ONNCCE-2004).

MICROSÍLICE.

En cuanto al uso de microsílíce en el concreto, en México se tiene hoy en día poca aplicación debido a que este material en la actualidad presenta en nuestro país un costo elevado, es por ello que es más utilizado en países como Estados Unidos, China y la Unión Europea. Sin embargo, la tendencia a nivel mundial nos indica que a mediano plazo es probable que se empiece a utilizar más en los proyectos de construcción en México, por ser un país en vías de desarrollo, siempre y cuando se difunda el beneficio de las propiedades que éste aporta al concreto y se concientice su utilización.

b. Descripción funcional y/o operativa.

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.

En nuestro país, la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara son las urbes donde existen el mayor número de edificios en los cuales su estructura está constituida de concreto reforzado. De acuerdo a la **Tabla 1**, la ciudad de México es la octava urbe a nivel mundial

con más rascacielos y edificios, los cuales en gran parte su estructura es de concreto reforzado.

Tabla 1 – Ciudades con más rascacielos (12 niveles o más de 35 m de altura) y edificios en el mundo (con más de 20 m de altura)[1].

	CIUDAD	NÚMERO DE RASCACIELOS Y EDIFICIOS
1	Nueva York	6487
2	Toronto	2445
3	Tokyo	1284
4	Shanghai	1238
5	Chicago	1204
6	Kiev	1190
7	Hong Kong	1105
8	Ciudad de México	974
9	Vancouver	901
10	Bangkok	834

No sólo tenemos elementos de concreto en edificaciones como edificios y rascacielos. En nuestro país existen 31.4 millones de hogares de los cuales en la mayoría en su construcción existen elementos de concreto. En el sector de caminos y puentes en México, tenemos actualmente 8493 puentes de la red de carreteras libres, los cuales en su gran mayoría están constituidos por elementos de concreto y su año promedio de construcción oscila entre 1970 y 1985 los cuales requieren de conservación periódica constante. Existen 15,252 km de carreteras pavimentadas de cuatro carriles o más, mientras que 141,545 km son pavimentadas de dos carriles; de éstas, aproximadamente el 12% son de pavimento de concreto, así mismo, está contemplada la modernización de estos caminos en un futuro y la construcción de nuevas carreteras con pavimento de concreto hidráulico ya que éstas generan ahorros en mantenimiento hasta en un 90%, lo que refleja un volumen importante de concreto a utilizar en los próximos años.

Todos estos tipos de construcciones de concreto deben de someterse a una inspección y mantenimiento en su estructura periódicamente, ya que una buena labor de sostenimiento evita que se presenten situaciones indeseables durante su vida útil. Las labores de mantenimiento regulares, planificadas y presupuestadas, siempre y cuando sean correctas hacen mínimos los costos de operación de las estructuras, dado que éstas van envejeciendo es necesario hacerles una evaluación cada cierto número de años, es donde los métodos no destructivos son eficaces para realizar estas actividades preventivas de inspección, mantenimiento y/o conservación.

MICROSÍLICE.

La adición de microsílize en el concreto, actualmente es objeto de estudio de algunas instituciones académicas en nuestro país, sin embargo, en México existen hasta el momento pocas investigaciones que respalden sus propiedades utilizando los insumos locales para elaborar concreto.

1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO.

1.3.1. CAUSAS.

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.

El método estándar para evaluar la calidad del concreto en edificios o estructuras es el de ensayar especímenes colados simultáneamente para evaluar resistencia a la compresión, flexión, tensión y otros procedimientos que sirven para valorar las propiedades mecánicas y de durabilidad. Una de las mayores desventajas de estos procedimientos es que los resultados no son obtenidos inmediatamente y el concreto que fue evaluado en especímenes en el laboratorio puede diferir de las condiciones reales en que se encuentra la estructura en evaluación como resultado de un probable curado, compactado o proceso constructivo deficiente.

Los métodos no destructivos proporcionan resultados indirectos que pueden ser relacionados a varias propiedades de estructuras de concretos. En las últimas décadas, se han desarrollado distintos métodos no destructivos desde el índice de rebote hasta las nuevas y más sofisticadas técnicas basadas en la propagación de ondas a través del concreto. Con el

desarrollo de las nuevas tecnologías de software y los avances en el área de la informática, los métodos no destructivos se han vuelto cada día más populares en los países desarrollados y su utilización de parte de investigadores e ingenieros ha incrementado por su rápida evaluación e interpretación de resultados.

Los métodos no destructivos no causan ningún daño a las estructuras y no dañan a los especímenes que son requeridos para su ensayo en el laboratorio. Además, pueden ser utilizados en distintos aspectos de la Ingeniería Estructural y la Ingeniería Forense en el sector de la construcción, desde la prevención, inspección y mantenimiento hasta dictaminar y evaluar fallas en las estructuras de forma rápida y económica.

En el futuro, los métodos no destructivos serán muy importantes para varios propósitos como la identificación de los niveles de deterioro y en la proyección de la vida útil de las estructuras, extrayendo información a fondo de las propiedades de los materiales y desarrollando métodos para combinar resultados de diferentes métodos no destructivos, para mejor evaluación de las condiciones de las estructuras de concreto.

MICROSÍLICE.

En la norma ASTM C1240 se especifican los requerimientos mínimos para la utilización del microsíllice en el concreto. De acuerdo a distintos estudios e investigaciones sabemos que éste ayuda a mejorar las propiedades del concreto por mecanismo físicos y químicos. Los mecanismos físicos incluyen la reducción del sangrado, provisión de sitios de nucleación y un empaquetamiento más eficiente de las partículas sólidas (refinamiento de poros). El mecanismo químico, es su rápida reacción con el CH para formar C-S-H generando un matriz cementante de buena densidad desde edades tempranas. Sin embargo, actualmente la relación entre las variaciones en las propiedades físicas y composición química del microsíllice y el desempeño en el concreto no están bien establecidas debido a la falta de más información acerca de este material. Son amplias las investigaciones que resaltan el efecto benéfico del microsíllice en concreto convencional y actualmente existen publicaciones especiales alusivas al tema. De acuerdo a estas publicaciones la ceniza volante y el microsíllice tienen propiedades puzolánicas (es decir, la capacidad de reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio en presencia de agua a temperatura ambiente y producir un material cementante) y

pueden usarse como adición o reemplazo parcial del cemento Portland reduciendo su consumo en la producción de concreto y mejorando muchas de sus propiedades.

El microsílice ya es empleado en nuestro país principalmente a nivel laboratorio. Sin embargo, no se ha explotado todo su potencial en campo, debido quizá a la falta de experiencias en su uso aquí en México. La norma NMX-C-146-ONNCCE-2000, permite el uso de 5% (respecto a la masa de cemento) de ceniza volante como adición (sin reemplazar cemento) durante la fabricación de concreto. A diferencia del microsílice, en México se generan cenizas volantes, aunque las cantidades generadas no se conocen con precisión. En Estados Unidos se estima una producción de 63 millones de toneladas de ceniza volante anualmente de las cuales el 20% es usada en la fabricación de concreto. En cuanto al microsílice, aproximadamente 1 millón de toneladas son producidas anualmente en todo el mundo de las cuales el 20% es usada en la producción de concreto. En lo que a cemento Portland se refiere, la producción mundial es de aproximadamente 1.5 billones de toneladas, con la consecuente emisión de casi la misma cantidad de toneladas de CO₂, lo que equivale aproximadamente al 7% de las emisiones globales, teniendo así la industria del cemento una aportación importante en la contaminación del medio ambiente.

1.3.2. CONSECUENCIAS DEL PROBLEMA.

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS.

La combinación de distintos métodos para evaluar estructuras es necesaria hoy en día para tener resultados con mayor precisión. Normalmente los ingenieros utilizan un solo método no destructivo para la evaluación de un parámetro, pero a veces la combinación de varios métodos para corroborar los resultados es necesaria. Por ello, en esta investigación se desarrollaron diagramas triples de interacción de las propiedades del concreto utilizando distintos métodos no destructivos.

Los resultados de los métodos no destructivos son completos y proporcionan información detallada del concreto ensayado. En ocasiones ha sido difícil para los ingenieros entender su metodología, ya que se requiere experiencia y conocimiento para manejar los equipos utilizados para los ensayos no destructivos y la interpretación de sus resultados, es por ello que el desarrollo de investigaciones en el ámbito de los ensayos no destructivos es necesario

para perfeccionar, fomentar su uso y dar un paso adelante en lo que se refiere a tecnología avanzada del concreto.

MICROSÍLICE.

El costo de las cenizas volantes es más bajo que el del cemento, no así el del microsílize que es 10 veces mayor; sin embargo, debido a que el microsílize puede hacer que un concreto sea mucho más durable, su uso contribuye a que las estructuras sean más eficientes (con menor cantidad de cemento), es decir, con menos necesidad de reparación y mantenimiento y, por lo tanto, el impacto a la economía es favorable y la contaminación al medio ambiente se reduce, por ello la importancia de investigaciones respecto a la utilización de microsílize para aprovechar el mejoramiento de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

2.1. MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL.

2.1.1. CEMENTO Y CONCRETO.

En la antigüedad, se utilizaba arcilla para la unión de piedras para formar estructuras sólidas. El concreto más antiguo descubierto data de cerca del año 7000 A.C., y fue descubierto en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida, la cual cuando fue mezclada al agua y a la piedra se endureció formando el concreto[2; 3].

En el año de 2500 A.C. aproximadamente, se utilizó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide de Giza en Egipto. Algunos informes describen que era un mortero de cal, mientras que otros hablan que el material cementante se produjo por la quema de sulfato de calcio.

En el año 500 A.C., el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a la antigua Grecia. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes entre piedras y ladrillos y como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.

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

Los constructores antiguos de los famosos muros de Roma, acueductos y otras estructuras históricas, incluyendo el teatro en Pompea, el Coliseo y el Panteón en Roma usaron este material. Parece que la puzolana fue ignorada durante la edad media, cuando las prácticas de construcción eran mucho menos refinadas que las antiguas y la calidad de los materiales cementantes deteriorada. La práctica de calcinación de la cal y el uso de puzolanas no se usó nuevamente hasta el siglo XIV.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porque algunos tipos de cal poseían propiedades hidráulicas mientras que otras que eran producidas de calizas fundamentalmente puras no las poseían. El llamado padre de la ingeniería civil en Inglaterra, John Smeaton, concentró su trabajo en este campo. Descubrió que las calizas impuras y blandas, conteniendo materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos.

Durante sus trabajos de investigación, Smeaton empleó este cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del faro de Eddystone en Inglaterra. El proyecto le llevó tres años para que su terminación y la operación comenzó en 1759. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente.

La diferencia entre la cal hidráulica y el cemento natural es función de la temperatura alcanzada durante la calcinación. Además, una cal hidráulica puede hidratarse en una forma

de terrón, mientras que los cementos naturales deben ser finamente molidos antes de la hidratación. El cemento natural es más resistente que la cal hidráulica, pero menos resistente que el cemento Portland. El cemento natural se fabricó en Rosendale, Nueva York en el inicio del siglo XIX [4] y se empleó en la construcción del canal Erie en 1818[5].

El desarrollo del cemento Portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. Su invención se atribuye normalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés. En 1824, obtuvo la patente para este producto, al cual lo nominó cemento Portland pues producía un concreto con color semejante a la caliza natural que se explotaba en la isla de Portland en el Canal de la Mancha. Este nombre permanece hasta hoy y se usa en todo el mundo, con la adición de las marcas y nombres comerciales de sus productores[6].

Aspdin fue el primero a prescribir una fórmula para el cemento Portland y el primero en patentarlo. Sin embargo, en 1845, I.C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó, produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos.

Este cemento se volvió la elección popular en la mitad del siglo XIX y se exportó de Inglaterra para varias partes del mundo. La producción también empezó en varios países de Europa aproximadamente en el mismo periodo y su exportación a Estados Unidos comenzó en 1865.

El primer cemento Portland producido en Estados Unidos se fabricó en una planta en Coplay, Pensilvania en 1871. La producción de cemento en algunos países de Latinoamérica comenzó al final del siglo XIX y particularmente en México en el año de 1903[7].

2.1.2. MICROSÍLICE.

En sus inicios, el microsílíce fue utilizado como adición para la elaboración de ladrillos. Se comenzó añadiéndose en determinadas proporciones a su composición, evidenciándose mediante la cocción propiedades tales como buena estabilidad volumétrica, dureza y resistencia.

En la década de 1950 quedó registrada la primera prueba en concreto de cemento Portland con el uso de microsílíce. Posteriormente, fue hasta principio de la década de 1970 que comenzó a utilizarse aún de forma limitada, siendo la principal limitante la disponibilidad de material para el desarrollo de ensayos. Las investigaciones iniciales utilizaron sílice ahumado, un costoso aditivo en forma de sílice coloidal, resultante de la combustión del tetracloruro de silicio.

Debido a que la industria del ferrosilicio era considerada una fuente de contaminación importante, a mediados de la década de 1970 se comenzó a recoger el microsílíce de las fundaciones de silicio, consecuencia de la aplicación de rigurosas leyes para la protección del medio ambiente.

Hasta entonces, este subproducto pasaba a formar parte de desechos atmosféricos de importantes industrias de Europa y Estados Unidos. En la medida en que fue más riguroso el control de las emisiones (sobre todo en países nórdicos), se fueron perfeccionando los mecanismos de filtración y captación de estos desechos. En la actualidad, en vez de desecharlo, el reto está en realizar investigaciones para establecer sus posibles aplicaciones y principales ventajas en su utilización como adición al concreto[8].

2.1.3. DURABILIDAD.

El tema de durabilidad en el concreto empezó a tomar mucha importancia durante la segunda mitad del siglo XX. Parece que, a pesar de algunos importantes descubrimientos valiosos desde el punto de vista de la mejora de la durabilidad en el concreto, hoy en día más estructuras de concreto parecen sufrir de falta de durabilidad a comparación de estructuras de hace 50 años. Por orden de importancia decreciente, las principales causas de deterioro del concreto en la actualidad son las siguientes: corrosión del acero de refuerzo, acción de la congelación – deshielo en climas fríos y los efectos físico – químicos en ambientes agresivos. Sin embargo, otros factores actúan en la durabilidad del concreto como lo son la contracción, la fisuración por temperatura, abrasión, erosión, reacción álcali en los agregados o ataque por ácido[9].

Desde hace años, existe un acuerdo general de que la permeabilidad del concreto, en lugar de las variaciones normales en la composición del cemento Portland, es la clave para todos

los problemas de durabilidad. También existe un acuerdo general de que el rápido crecimiento de la industria de la construcción del concreto después de la década de 1940 condujo a la producción y uso de mezclas de concreto húmedo, las cuales son capaces de cumplir con los requisitos de resistencia a través de un cambio en la composición del cemento Portland, pero eran insatisfactorias desde el punto de vista de la corrosión del acero de refuerzo, la resistencia a los ciclos de congelamiento y descongelamiento, y a los ataques químicos.

El aumento de la agresividad química del medio ambiente a través del uso mayor de cada vez más sales de deshielo, y el aumento de la contaminación de la tierra, agua y aire, también ha contribuido a los problemas de durabilidad del concreto. Aunque se han realizado avances significativos en lo que respecta a la compresión y el control de diversos fenómenos físicos y químicos responsables del deterioro del concreto, todavía no se ha invertido la tendencia hacia estructuras de concreto menor duraderas. Una de las razones es que la mayor parte de la información de las pruebas de durabilidad está en forma fragmentada y no puede sintetizarse fácilmente en una comprensión completa de los efectos reales, a largo plazo, sobre el concreto en el campo. Por lo tanto, la excesiva dependencia de los métodos de ensayo y las especificaciones relativas a los diferentes aspectos de la durabilidad se ha convertido en parte del problema, ya que los ensayos de laboratorio acelerados no se correlacionan bien con el comportamiento de las estructuras de concreto en la práctica[10].

La importancia cada vez mayor que se concede al rendimiento de las estructuras a lo largo de toda su vida útil, significa que existe una demanda creciente de durabilidad con mínimos requerimientos de mantenimiento. Además, la exploración de las infraestructuras más allá de la vida útil originalmente prevista se está convirtiendo cada vez más en un escenario común. Así, la durabilidad de los materiales de construcción es de más preocupación que nunca para los ingenieros civiles y el sector de la industria de la construcción.

El concreto es un material altamente duradero que como ya se ha mencionado es capaz de impartir protección al acero incrustado en él. Sin embargo, las estructuras de concreto al requerir con frecuencia para su funcionamiento durante su vida útil una alta durabilidad en una amplia gama de ambientes agresivos por largos periodos de servicio, las medidas para optimizar esta durabilidad a menudo se encuentran en conflicto con requisitos estructurales

y de diseño estético. En la última década, la introducción de nuevas normas europeas ha tratado de resolver esta situación de manera integral[9].

2.1.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Desde finales de la década de 1950 hasta la actualidad, los ensayos no destructivos han experimentado un desarrollo, una innovación sin precedentes, y un crecimiento a través de nuevos instrumentos y materiales.

La capacidad de interactuar muchos de los últimos equipos con computadoras ha tenido un impacto dramático en esta tecnología. La capacidad de almacenar grandes cantidades de datos con capacidad de archivado casi instantáneo llevó a los ensayos no destructivos a un nivel que antes sólo se imaginaba, pero la tecnología de este tipo de ensayos todavía aún está en su infancia.

Su desarrollo seguirá creciendo a medida que se presenten nuevos desafíos a través de la expansión tecnológica y el desarrollo de materiales únicos. La búsqueda para detectar e identificar las discontinuidades más pequeñas no terminará hasta que las fallas catastróficas ocurridas en las estructuras ya no se puedan relacionar con la existencia de defectos de los materiales con que éstas son construidas.

Las raíces de los ensayos no destructivos comenzaron a tomar forma antes de la década de 1920, luego de los métodos que se conocen hoy en día no aparecieron hasta finales de la década de 1930 y principios de la década de 1940.

Gran parte de estos últimos se produjeron como resultado del avance de la tecnología en la segunda guerra mundial. En la década de 1920 había una conciencia de algunos ensayos como lo son las pruebas de partículas magnéticas, los métodos de pruebas visuales y la radiografía con rayos X, que en ese momento se utilizaba principalmente en el campo médico.

En los primeros tiempos de la navegación ferroviaria, se empezaron a utilizar pruebas no destructivas como la denominada prueba del aceite y el merlán. También hubo algunas pruebas eléctricas básicas utilizando algunos de los principios básicos en las pruebas de corrientes inducidas.

El método sónico, así como algunas técnicas radiográficas arcaicas de rayos gamma, usando el radio como fuente de radiación, fueron usadas con éxito limitado. De estos ensayos la tecnología de ensayos no destructivos ha evolucionado para abarcar los muchos y sofisticados métodos que se utilizan hoy en día[11]. Como, por ejemplo, el ensayo esclerométrico o índice de rebote mediante esclerómetro para determinar la resistencia del concreto, el cual fue desarrollado por el ingeniero suizo Ernest Schmidt en la década de 1940[12], y en esa misma década el ensayo de ultrasonido desarrollado en los Estados Unidos por el Dr. Floyd Firestone[11].

Los ensayos no destructivos de más estudio en los cuales se han logrado en distintas ocasiones emitir correlaciones entre las propiedades del concreto (en este caso la resistencia), son el ensayo para la determinación del índice de rebote (esclerometría) y el ensayo de velocidad de pulso (método ultrasónico), esto debido a que de estos existen muchos datos estadísticos experimentales los cuales sirven para análisis y estudios independientes [13]. Las técnicas de los ensayos no destructivos son sensibles primeramente a las propiedades físicas y reflejan solamente una forma indirecta del rendimiento de los materiales. Al cuantificar una propiedad mecánica de un material como lo es la resistencia para una evaluación, se esperan valores lo más cercanos a la realidad, incluso con un cierto rango de incertidumbre. Es por ello que, desde hace varios años, se han realizado cuantiosos estudios acerca del desarrollo de los ensayos no destructivos de los materiales con el afán de obtener cada vez datos más precisos de los resultados.

Algunos autores han intentado sintetizar las ventajas de los ensayos no destructivos con sus respectivas desventajas y definir las formas más acertadas para su desarrollo. Usualmente es aprobado que la calidad de una evaluación está limitada a la incertidumbre de la fuente en la cual se describa el tipo de método, ciertas interferencias existentes en el ambiente, interferencias al azar debidas a la variabilidad intrínseca del material, a la influencia del factor humano y por la interpretación de los datos, incluyendo errores en el modelo entre lo que se esté midiendo y lo que se esté observando. La dificultad de correlacionar los valores de las pruebas físicas de las medidas en los ensayos no destructivos con las propiedades mecánicas de los materiales ha sido señalada desde hace mucho tiempo. Los ensayos no destructivos

son usados actualmente en combinación con ensayos destructivos, logrando proveer una información más directa y exacta mediante correlaciones [13].

2.2. ESTADO DEL ARTE.

Esta investigación busca correlacionar propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto convencional y concreto con adición de microsílíce, mediante métodos destructivos y no destructivos. Este tipo de investigaciones se han venido desarrollando desde el siglo pasado y últimamente con el desarrollo de nuevas tecnologías, existen ensayos de mayor exactitud y precisión que son acreditados por las normativas y especificaciones relacionadas con la industria de la construcción.

En el 2002, un artículo desarrollado por M. A. Rashid, M.A. Mansur, M. ASCE y P. Paramasivam, discute algunas importantes propiedades de ingeniería del concreto para un rango de resistencia a la compresión. En su investigación recolectaron un gran volumen de datos experimentales seleccionados de la literatura existente en ese momento y luego los analizaron. En su artículo hicieron especial hincapié en los efectos de la resistencia del concreto sobre el módulo de elasticidad, la resistencia a la tensión y el módulo de Poisson de éste. También estudiaron el efecto del tamaño de las muestras en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto, todo esto para predecir el módulo de elasticidad y resistencia a la tensión mediante parámetros de resistencia a la compresión en mezclas de concreto con resistencias de hasta 120 MPa. En los ensayos que desarrollaron, encontraron que las diferencias entre la resistencia a la compresión del concreto determinada con probetas de 100 × 200 mm y 150 × 300 mm se mantienen dentro del 5% tanto para el concreto de resistencia normal como para el concreto de alta resistencia. Sin embargo, el efecto del tamaño de las probetas en los valores de módulo de elasticidad es bastante pronunciado y es mayor para concreto de alta resistencia, por lo tanto, recomendaron correlacionar los valores de módulo de elasticidad de las probetas de 100 mm de diámetro con los valores correspondientes obtenidos de las probetas de 150 mm de diámetro. El efecto del tipo de agregado grueso sobre el módulo de elasticidad es obvio tanto para concreto de resistencia normal como para concreto de alta resistencia. Incluso con un agregado grueso particular, el módulo de elasticidad del concreto puede variar dentro de un rango considerable. Es por eso que los valores pronosticados del módulo de elasticidad tanto para concreto de

resistencia normal y de alta resistencia, pueden diferir significativamente de los valores de ensayo correspondientes. Sin embargo, un coeficiente del agregado grueso fue introducido en una de las ecuaciones desarrolladas en la investigación para verificar el efecto del tipo de agregado grueso. Los tamaños de las probetas cilíndricas para la resistencia a la tensión o los prismas para la resistencia a la flexión no tienen efecto reconocible en su respectiva resistencia a la tensión. Sin embargo, la dispersión de los datos de prueba (ambas tensión y flexión) para una resistencia a la compresión particular es bastante mayor para concreto de alta resistencia, en comparación con el concreto de resistencia normal. Al final de lograron desarrollar ecuaciones para estimar la resistencia a la tensión y a la flexión respectivamente, proporcionando un mayor refinamiento que abarca una resistencia a la compresión del concreto entre 5 y 120 MPa. A diferencia del módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión, la relación de Poisson para concreto de alta resistencia es comparable a la de concreto de resistencia normal[14].

En otro artículo más reciente desarrollado en el año 2013 por Petr Hunka, Jiri Kolisko, Miroslav Vokac y Stanislav Rehacek, se resumieron las influencias de tecnología y las influencias de los tipos de ensayos de módulo de elasticidad del concreto, presentando en su investigación mayor detalle de los resultados de medición experimental de las influencias de forma, dimensiones de la probeta en ensayo, el método de cabeceado en la superficie de la probeta y el nivel de carga aplicada. Nos hablaron de que no sólo la durabilidad, sino también las características de deformabilidad del concreto han despertado el interés de los expertos de los últimos años. Una de las características de deformabilidad de cada tipo de concreto es el módulo de elasticidad del concreto. El módulo de elasticidad del concreto es parte de varios cálculos estáticos y tiene una relación cercana a otras características físicas y mecánicas del concreto como lo son la fluencia, la contracción, la resistencia al congelamiento, etc. Los valores finales de módulo de elasticidad del concreto dependen de varias influencias y estas influencias pueden ser básicamente clasificadas como influencias de ensayos o influencias de tecnología. Al final de la investigación, concluyeron que era evidente que las condiciones límite de los ensayos podían tener una influencia substancial en los resultados de los valores del módulo de elasticidad del concreto ensayado. Desde el punto de vista del método de cabeceado se puede afirmar que éste tiene una influencia bastante interesante en el valor final del módulo de elasticidad y compresión. Se obtuvieron valores balanceados del módulo de

elasticidad y compresión, cabeceando con azufre, cemento y yeso. Resultados sorprendentes fueron obtenidos mediante cabeceo con casquetes de neopreno, cuando el módulo de elasticidad fue casi idéntico pero la resistencia a la compresión fue completamente diferente. Basándose en las mediciones desarrolladas pudieron afirmar que los valores mayores de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad fueron alcanzados con los casquetes de neopreno. Por otro lado, las probetas con superficie alisada fueron las que desarrollaron los valores menores de módulo de compresión. Las diferencias entre la utilización de azufre, cemento o mortero en el cabeceo respecto a la compresión y módulo de elasticidad fueron relativamente pequeñas y estos métodos de cabeceo arrojaron valores promedio medios. La cantidad de nivel de carga superior en los ensayos de módulo de elasticidad bajo compresión tiene una influencia considerable en el resultado, incluso en el caso de que las variaciones del nivel requerido fueron relativamente pequeñas, aproximadamente hasta un $\pm 10\%$. Es por ello que el actual procedimiento para determinar el módulo de elasticidad del concreto debe ser ejecutado con muchos cuidados y los reportes deberán especificar toda la información necesaria de las condiciones de ensayo[15].

Otros investigadores emplearon métodos no destructivos para estudiar el módulo de elasticidad del concreto. En el 2015, Jorowski y Grzeszczyk desarrollaron en su investigación un método dinámico de pruebas de concreto usando el módulo de Young. Compararon las ventajas del método dinámico que desarrollaron con el método estático y las posibilidades de aplicación en la práctica. El procedimiento para el ensayo de módulo de elasticidad dinámico lo presentaron en su artículo. El módulo de Young de muestras de concreto de diferentes composiciones fue probado mediante métodos estáticos y dinámicos. Al final, la investigación de las mezclas de concreto autocompactable que utilizaron, demostraron que el concreto con agregados naturales necesita significativamente menos agua para lograr que la fluidez requerida de la mezcla de concreto en comparación con las mezclas de concreto con agregado basáltico triturado. Los ensayos de módulo de Young del concreto demostraron que los valores obtenidos con los ensayos por el método dinámico son claramente mayores que aquellos obtenidos por el método estático. El valor de módulo de Young del concreto (ambos estático y dinámico) para concreto autocompactable con agregado basáltico triturado es mayor que en el caso con agregado natural, aunque ambas mezclas de concreto tienen valores de resistencia a la compresión similar. Los resultados de los ensayos de concreto

(concreto autocompactable y concreto de alto desempeño) muestran, que las diferencias entre el módulo estático y dinámico de Young son menores con un incremento de volumen de agregado grueso[16].

Otro método no destructivo muy utilizado es el esclerómetro. De las tantas investigaciones desarrolladas al respecto, podemos mencionar la que J. Brozovsky realizó en el 2013. En su trabajo realizó ensayos para comparar el martillo de impacto Schmidt y el martillo puntiagudo de Masek, en la búsqueda de tener resultados más precisos de resistencia del concreto. Sin embargo, no pudo demostrar la hipótesis de que la resistencia del concreto a un área particular ensayada con varios tipos de martillos de impacto tipo Schmidt y evaluados sobre la base de una correlación de calibración común para un martillo de impacto dado, deben proporcionar los mismos valores de resistencia a la compresión del concreto. Así que en el caso de que fuese necesario la utilización de varios tipos de martillos de impacto de este tipo, es necesario tomar en cuenta esta circunstancia al momento de interpretar resultados. También recomendó que, para obtener valores correctos de la resistencia a la compresión, se aplicaran los coeficientes de corrección de la normativa checa CSN 73 1370 o CSN EN 13791, la cual esta corrección está basada en ensayos no destructivos y es esencial cuando los resultados deben servir como base de datos para análisis estadísticos de una estructura en la prueba de que su calidad del concreto con que está construido es mayor de un año. En las conclusiones de su investigación, estipuló que era necesario definir independientemente un coeficiente de corrección para cada tipo de esclerómetro y de acuerdo a los resultados, recomendó utilizar el martillo puntiagudo de Masek para concretos con resistencia mayor a 12 MPa[17].

En conjunto con el ensayo del esclerómetro, otro método no destructivo muy utilizado actualmente es el de la velocidad de pulso ultrasónico. En el 2016, en un trabajo de investigación desarrollado por F. Saint-Pierre, A. Philibert, B. Giroux y P. Rivard para estudiar el concreto mediante la velocidad de pulso ultrasónico, mencionaron que evaluar el estado del concreto original de las grandes estructuras construidas a principios del siglo XX era una parte importante de los programas de revisión de seguridad. Sin embargo, en la mayoría de las grandes estructuras de concreto, la rehabilitación a lo largo de los años se ha llevado a cabo y documentado en sólo en un limitado número de casos. Además, usualmente

el concreto original se puede ocultar bajo nuevas capas de material de reparación y permanece inaccesible para una evaluación adecuada en sitio. Las mediciones de la velocidad de pulso ultrasónico pueden ser indicativas del nivel de daño de una estructura de concreto, sin embargo, ésta está influenciada por las características de la mezcla de concreto, lo que puede dar lugar a ambigüedades en la interpretación de los resultados. El propósito de la designación de calidad del concreto que ellos propusieron en su investigación, fue de determinar el grado de daño en el concreto en relación con su condición original e intacta. Ésta propuesta en su trabajo se basó en una comparación entre resultados de velocidad de pulso ultrasónico en sitio y de laboratorio, haciendo correcciones con respecto a las características de las mezclas de concreto investigadas. Los resultados mostraron que la designación de calidad del concreto fue un método preciso y suficientemente sensible a muy bajos y muy altos grados de daño. En sus conclusiones, mencionan que una revisión de las condiciones estructurales de la presa de Frontenac se llevó a cabo sobre la base de análisis y extracción de testigos para ensayos de velocidad de pulso ultrasónico. El estudio mostró que algunos muelles estaban más dañados que otros y la designación de calidad del concreto de esta investigación permitió estimar la calidad del concreto con una mayor precisión que el enfoque convencional del ensayo de pulso ultrasónico, que es dependiente de las características de colado original del concreto. La designación de calidad del concreto que en esta investigación fue propuesta, proporcionó información suplementaria a la obtenida de un RQD (Rock Quality Designation) y cualquier otros análisis y criterios aislados. Finalmente, su designación de calidad del concreto estuvo basada en mediciones de velocidad de pulso ultrasónico, la cual puede ayudar a identificar áreas dañadas que necesitan ser reparadas. Por lo tanto, con esto puede demostrarse que el ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico, puede ser de gran ayuda para resolver problemas de ingeniería forense e ingeniería estructural[18].

Los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico, también han sido objeto de investigación para predecir y correlacionar la resistencia del concreto. En un artículo realizado por N. Sabbag y O. Uyanik en 2017, desarrollaron un estudio que tenía como objetivo determinar la resistencia del concreto armado y revelar el efecto de la armadura sobre la resistencia del concreto, mediante velocidades ultrasónicas. Los estudios se llevaron a cabo con la preparación de nueve diferentes diseños de mezclas de concreto de baja, media y alta

resistencia, cuatro tipos de muestras cúbicas no reforzadas e incluyendo refuerzos de 10, 14 o 20 mm de diámetro. Los estudios se llevaron a cabo en un total de 324 muestras incluidas las nueve muestras para cada uno de los cuatro tipos de diseño. Las muestras preparadas fueron sometidas a curado con agua. En los resultados, se obtuvieron parámetros que indicaban mayor durabilidad en concretos que tenían mayor edad de curado, es decir, el curado del concreto afecta su durabilidad en función del tiempo, independientemente del tipo de diseño de mezcla de baja, media o alta resistencia. También obtuvieron correlaciones de resistencia del concreto, comparando el método no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico con un método destructivo uniaxial de resistencia a la compresión, sometiendo a carga hasta la falla a probetas cilíndricas y cúbicas entre las placas de acero de la prensa hidráulica en una máquina de prueba de compresión uniaxial. Los resultados fueron satisfactorios obteniendo coeficientes de correlación mayores al 90%. En sus experimentos observaron que, a mayor contenido de agua en la dosificación del concreto, los valores de velocidad de pulso ultrasónico eran menores, por lo tanto, su durabilidad decrecía [19].

Algunos investigadores, demostraron que combinando métodos no destructivos se obtenían mejores correlaciones. De varias investigaciones al respecto, cabe mencionar la desarrollada por S. Hannachi y M. N. Guetteche en el 2012. Para el desarrollo de sus ensayos combinaron dos métodos destructivos muy utilizados en el control de calidad del concreto y estimar su resistencia a la compresión: el de velocidad de pulso ultrasónico y el del esclerómetro. Varios parámetros son los que influyen sobre la resistencia a la compresión del concreto, como son el tipo y tamaño máximo del agregado o contenido de cemento. Para tomar en cuenta estos factores, ambos métodos no destructivos fueron combinados y sus mediciones fueron calibradas con los resultados de ensayos mecánicos de especímenes cilíndricos elaborados en sitio y de núcleos extraídos de la estructura existente en estudio, la cual se encontraba en la ciudad de El Khroub, Argelia. Las ecuaciones desarrolladas en la investigación en mención, demostró que combinando los métodos no destructivos de velocidad de pulso ultrasónico y esclerómetro se logró obtener un coeficiente de determinación mayor para los resultados de resistencia del concreto [20].

En otro artículo publicado por A. Jain, A. Kathuria, A. Kumar, Y. Verma y K. Murari en 2013, en el cual presentaron resultados experimentales de su investigación en los efectos de

los materiales del concreto, elaboración de las mezclas y su respectiva mano de obra. Su investigación tenía por objeto desarrollar un método de uso combinado de los ensayos no destructivos para tener una mayor precisión en la determinación de la resistencia del concreto. Las variables de la mano de obra incluyeron diferentes longitudes de curado húmedo, compactación incompleta y defectos inducidos intencionadamente. Las lecturas del esclerómetro aumentaron con la resistencia a la compresión del concreto, mientras que los valores de velocidad de pulso ultrasónico fueron influenciados grandemente por los cementos y agregados, grado de curado húmedo, presencia de fallas y vacíos en el concreto más que su influencia en las resistencias medidas. Esto demostró que la limitación de utilizar los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico sin combinar otro método destructivo. Así que se abogó por la combinación de métodos no destructivos para determinar con mayor fiabilidad los resultados de resistencia del concreto. De sus estudios experimentales, concluyeron que las lecturas de los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico incrementaban con la edad, pero el cambio era menor, esto debido a que la densidad del concreto se desarrolla poco a edades mayores, por lo cual este tipo de ensayo no se recomienda para utilizarse sin ninguna combinación de otro método no destructivo para determinación de la resistencia del concreto. Con los resultados que obtuvieron combinando ambos métodos no destructivos, desarrollaron una curva de correlación para determinar la resistencia a la compresión del concreto. Por último, mencionaron que existió una disminución en las lecturas de la velocidad de pulso ultrasónico cuando se añadieron los defectos en las mezclas de concreto intencionalmente, ya que cuando estos defectos están presentes el pulso ultrasónico toma más tiempo para recorrer las probetas[21].

Debido a que en este proyecto de intervención se realizarán ensayos de porosidad del concreto, es importante mencionar el trabajo desarrollado por Z. Lafhaj, M. Goueygou, A. Djerbi y M. Kaczmarek en 2005, en el cual se presentaron resultados de estudios con mezclas de mortero de distintas relaciones agua – cemento que variaban desde 0.3 a 0.6 para determinar correlaciones utilizando ensayos de velocidad de pulso ultrasónico, porosidad y permeabilidad. En la investigación demostraron que la velocidad de pulso disminuía con el aumento de la porosidad y permeabilidad en el concreto, así como con el aumento del contenido de agua en el concreto. También lograron establecer correlaciones entre los resultados de velocidad de pulso ultrasónico, porosidad y permeabilidad para los diferentes

contenidos de agua en el concreto manejados y compararon sus resultados con los de otros investigadores, obteniendo resultados satisfactorios al predecir con sus modelos relaciones lineales entre las propiedades del concreto[22].

Otras propiedades del concreto en estudio en este proyecto de intervención son la resistividad eléctrica y la migración de cloruros, las cuales son métodos de ensaye para generalmente evaluar la durabilidad del concreto. En el artículo de investigación publicado en 2010 por A. Ramezani pour, A. Pilvar, M. Mahdikhani y F. Moodi, mencionan cómo estos dos métodos de prueba para evaluar la durabilidad en los últimos años se han utilizado para la investigación y desarrollo para correlacionarlos y así estudiar los concretos sostenibles. La resistividad del concreto es también un indicador adecuado para la penetración del concreto y la permeabilidad al ión cloruro. Son métodos no destructivos, simples, rápidos y económicos que en algunos casos también pueden desarrollarse en sitio. Sus resultados nos indican que la correlación de la resistividad del concreto con la penetración del agua y los datos de la prueba de penetración rápida de cloruro, existe una relación que puede ser usada para estimar la permeabilidad del concreto. Para una amplia de composiciones de concreto en términos de cemento y relación agua – cemento, la resistividad superficial puede ser utilizada como indicador eléctrico de la penetración del cloruro en el concreto. Ésta se puede utilizar especialmente en concreto cuando una gran parte de las reacciones químicas del cemento se han completado como por ejemplo en los concretos elaborados con microsilíce. En sus ensayos también realizaron pruebas de resistencia a la compresión para estudiar y tratar de correlacionar estos valores con los métodos no destructivos de resistividad y migración de cloruros. Los resultados también muestran que, aunque en concretos con un contenido similar de cemento se pueden encontrar diferentes correlaciones, pero en general debido a los diferentes mecanismos de resistencia a la compresión y de resistividad eléctrica, no existe una relación apropiada entre ellos, por lo tanto, no recomiendan utilizar resistividad eléctrica ni migración de cloruros como indicador para la evaluación de la resistencia a la compresión[23].

Por último, debido a que se estudiaron algunas propiedades de durabilidad con la adición de microsilíce al concreto durante el desarrollo de este proyecto, es importante mencionar la investigación realizada por Jobi, I. Pane, B. Hariandja e I. Imran en el 2012, donde utilizaron

nanosílice y microsílice para comparar la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto. Para obtener un concreto sostenible, la mezcla fue diseñada para tener una alta resistencia y una baja permeabilidad utilizando insumos lo más locales posibles. Los resultados mostraron que combinando la nanosílice y microsílice como adición en las mezclas de concreto se incrementaron tanto la resistencia a la compresión del concreto como su durabilidad. Para evitar el efecto de aglomeración, recomendaron en su estudio adicionar no más de un 10% de nanosílice y microsílice al concreto[24].

2.3. MARCO TEÓRICO.

2.3.1. CEMENTO.

El cemento Portland es producido por la pulverización del clínker. El clínker contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

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

Como las operaciones de las plantas de cemento se pueden diferenciar una de otra y el proceso de producción puede ser el tradicional o por el método seco, no se puede ilustrar adecuadamente por un mismo gráfico la producción de una planta de cemento. No existen instalaciones típicas para la producción del cemento, cada planta tiene diferencias significantes en disposición, equipos o apariencia en general.

Las materias primas seleccionadas para la elaboración del cemento (ver **Tabla 2**), se transportan de la cantera, se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada. La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca o vía húmeda. En el proceso por vía seca, las operaciones de molienda y

mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso por vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares.

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

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las propiedades de retracción y el desarrollo de resistencia. Ya durante el proceso de molienda, el clínker se muele tan fino que puede pasar, casi completamente, a través de un tamiz No. 325 (45 micrómetros). Este polvo gris extremadamente fino es el cemento Portland.[25; 26].

Tabla 2 - Fuentes de las materias primas usadas y la fabricación del cemento Portland[27].

<u>Cal, CaO</u>	<u>Hierro Fe₂O₃</u>	<u>Sílice Si O₂</u>	<u>Alúmina Al₂ O₃</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	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	
Esquisto*		Arenisca	Escoria	
Escoria		Esquisto*	Estaurolita	
		Escoria		
		Basalto		

TIPOS DE CEMENTO PORTLAND EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA.

Se fabrican diferentes tipos de cemento Portland para satisfacer a varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. Los cementos Portland en Estados Unidos se producen de acuerdo con las especificaciones ASTM C150, AASHTO M85 o ASTM C1157.

La ASTM C150, designa ocho tipos de cementos, los cuales son los siguientes:

Tipo I	Normal.
Tipo IA	Normal con aire incluido.
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos.
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido.
Tipo III	Alta resistencia temprana.
Tipo IIIA	Alta resistencia temprana con aire incluido.
Tipo IV	Bajo calor de hidratación.
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos.

La AASHTO M85 también utiliza cinco designaciones para el cemento Portland del I al V, en los cuales sus requisitos son casi idénticos a los de la ASTM C150.

TIPOS DE CEMENTO PORTLAND EN MÉXICO.

En México, los tipos de cemento de acuerdo a la norma NMX-C-414 se pueden resumir a continuación:

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

Tipo CEG Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

De los tipos de cemento mencionados anteriormente estos pueden ser de clase resistencia 20, 30, 30R, 40 y 40R. Sus características pueden ser de resistencia a los sulfatos (RS), baja reactividad álcali agregado (BRA), bajo calor de hidratación (BCH) o de color blanco (B).

El cemento portland se compone de cuatro compuestos principales conforme se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3 - Compuestos principales del cemento portland.

Compuestos principales del cemento portland			
Nombre del compuesto	Composición de óxido	Abreviatura	Nombre abreviado
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	Alita
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Celita
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Aluminoferrita

Estos cuatro compuestos se varían en diferentes porcentajes y dan lugar a los diferentes tipos de cemento.

2.3.2. CONCRETO.

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados, normalmente arena y grava creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementosos (cementantes) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta. Las principales reacciones químicas que se llevan a cabo cuando se hidrata el cemento son las siguientes:

- $\text{C}_3\text{S}: 2\text{C}_3\text{S} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} + 3\text{CA}(\text{OH})_2$
- $\text{C}_2\text{S}: 2\text{C}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CA}(\text{OH})_2$

Los principales productos de la reacción son el gel C-S-H (silicato cálcico hidratado) y el hidróxido de calcio o portlandita cuya fórmula química es Ca(OH)_2 . El gel C-S-H es el responsable de aglutinar a los agregados y soportar los esfuerzos mecánicos.

Generalmente los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial con partículas de hasta 9.5 mm; agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla No. 16. El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm ($3/4''$ o $1''$). Un agregado de tamaño intermedio de 9.5 mm ($3/8''$) es, algunas veces, adicionado para mejorar la granulometría general del agregado.

La pasta se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado o aire incluido (intencionalmente incorporado). La pasta constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto. El volumen absoluto del cemento está normalmente entre 7% y 15% y el volumen del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire atrapado varía del 4% hasta 8% del volumen (ver **Figura 1**).

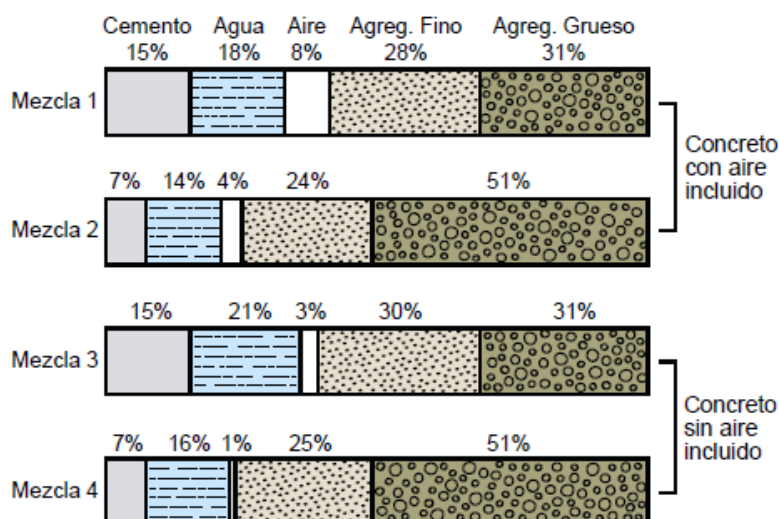


Figura 1 – Variación de las proporciones usadas en concreto, en volumen absoluto. Las barras 1 y 2 representan mezclas ricas con agregados de pequeño tamaño. Las barras 3 y 4 representan mezclas pobres con agregados gruesos grandes[27].

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen del concreto, su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioración del concreto. La granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta.

La calidad del concreto depende de la calidad de la pasta y del agregado y de la unión entre los dos. En un concreto adecuadamente confeccionado, cada y toda partícula de agregado es completamente cubierta por la pasta y todos los espacios entre las partículas de agregados se llenan totalmente con pasta.

Para cualquier grupo de materiales y condiciones de curado, la calidad del concreto endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento. Cuando grandes cantidades de agua son innecesariamente empleadas, ellas diluyen la pasta de cemento. Las ventajas de la disminución de la cantidad de agua son:

- Aumento de la resistencia del concreto.
- Disminución de la permeabilidad.
- Aumento de la durabilidad.
- Mejor unión entre concreto y armadura de acero en el concreto reforzado.
- Reducción de la contracción y agrietamiento del concreto.
- Menores cambios de volumen.

Cuanta menos agua se usa, mejor es la calidad del concreto, si es que la mezcla se puede consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezcla resultan en mezclas más rígidas; pero, con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser fácilmente colocadas. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejoría de la calidad del concreto.

Tanto las propiedades del concreto fresco como del concreto endurecido se pueden cambiar con la adición al concreto de aditivos químicos, normalmente en la forma líquida, durante la dosificación. Los aditivos químicos comúnmente se emplean para el ajuste del tiempo de fraguado o de endurecimiento, la reducción de la demanda de agua, el aumento de la trabajabilidad, la inclusión intencional de aire y el ajuste de otras propiedades del concreto fresco o endurecido.

Después del término del proporcionamiento, dosificación, colocación, consolidación, acabado y curado adecuados, el concreto se endurece, se transforma en un material no-combustible, durable, resistente a la abrasión e impermeable lo cual requiere poca o ninguna conservación y mantenimiento. Además, el concreto es un excelente material de construcción porque se le puede moldear en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizado en un número ilimitado de aplicaciones[27].

La microestructura típica en concreto convencional es la mostrada en la **Figura 2**.

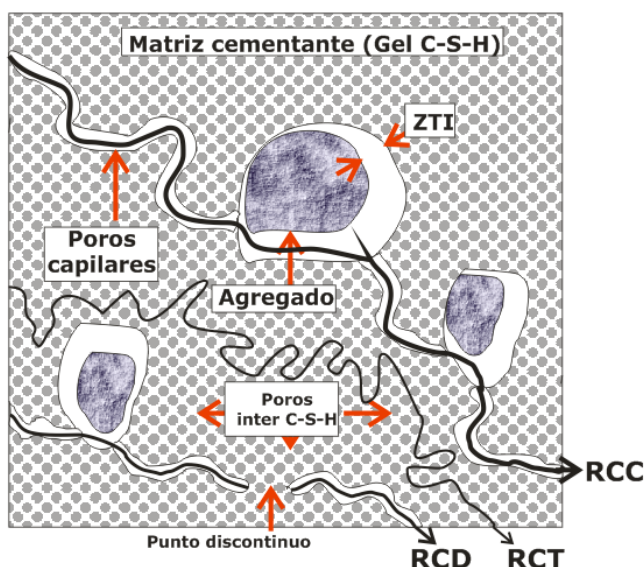


Figura 2 - Esquemización de la microestructura del concreto[28].

En la **Figura 2**, se puede observar que al interior del concreto existen poros capilares o Rutas conductivas Continuas que se generan por la exudación o sangrado del concreto. Estas rutas comunican el interior del concreto con el medio ambiente y por ellas se transportan los agentes (iones) agresivos del medio ambiente hacia el interior del concreto. Otra situación que se puede apreciar es que alrededor de los agregados se genera una mayor porosidad que en el resto de la matriz cementante; a esta zona se le llama zona de transición interfacial y ejerce una influencia en las propiedades mecánicas del concreto puesto que son sitios preferenciales de falla ante la aplicación de esfuerzos. En la **Figura 3** se presenta una micrografía real de una muestra de concreto convencional donde se aprecia lo descrito anteriormente.

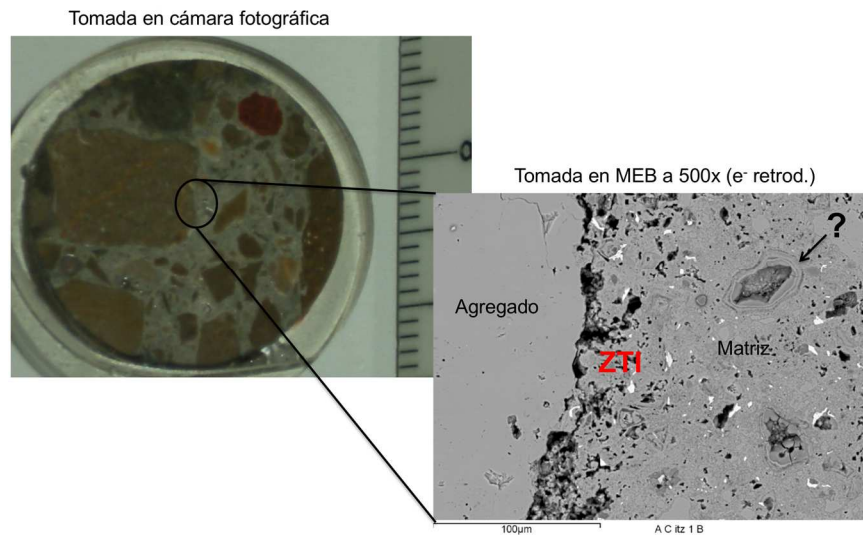


Figura 3 - Microestructura del concreto convencional[29].

2.3.3. MICROSÍLICE.

El ACI (American Concrete Institute) define al microsílíce o humo de sílice, como “sílice no cristalina muy fina producida en hornos de arco eléctrico como subproducto de la producción de silicio elemental o aleaciones que contienen silicio”. Por lo general, el microsílíce es un polvo de color gris, algo similar al cemento Portland o a algunas cenizas volantes.

El microsílíce se suele clasificar como material cementante suplementario. Este término se refiere a los materiales que se usan en el concreto además del cemento Portland. Estos materiales pueden presentar las siguientes propiedades:

- Puzolánico, no ganarán fuerza cuando se mezcla con el agua.
- Cementoso, ganan fuerza cuando se mezclan con el agua.
- Puzolánico y cementoso, una combinación de ambas propiedades.

El microsílíce es frecuentemente referido con otros nombres como humo de sílice, humo de sílice condensado o sílice volatizada.

Producción del microsílíce.

El microsílíce es un subproducto de la producción de silicio metálico o aleaciones de ferrosilicio en fundiciones que utilizan hornos de arco eléctrico y por lo general es un producto de desperdicio. Estos metales se utilizan en muchas aplicaciones industriales para incluir la producción de aluminio y acero, la fabricación de chips de computadora y la producción de siliconas, que son ampliamente utilizados en lubricantes y selladores. Aunque estos materiales son muy valiosos, el subproducto del microsílíce es de mayor importancia para la industria del concreto.

Propiedades y reacciones en el concreto.

Propiedades químicas.

Las principales propiedades químicas del microsílíce son:

- *Amorfo*. Este término simplemente significa que el microsílíce no es cristalino. Un material cristalino no se disuelve en el concreto, lo que debe ocurrir antes de que el material pueda reaccionar. No olvidemos que hay un material cristalino en el concreto que es químicamente similar al microsílíce, el cual es la arena. Mientras que la arena es esencialmente dióxido de silicio (SiO_2), no reacciona debido a su naturaleza cristalina.
- *Dióxido de silicio (SiO_2)*. Este es el material reactivo del microsílíce.
- *Oligoelementos*. Puede haber materiales adicionales en el microsílíce basados en el metal que se produce en la fundición de la cual éste se recuperó. Usualmente estos materiales no tienen ningún impacto en el desempeño del microsílíce en el concreto.

Propiedades físicas.

Las propiedades físicas primarias del microsílíce son:

- *Tamaño de la partícula*. Las partículas de microsílíce son extremadamente pequeñas, con más del 95% de las partículas inferiores a $1\ \mu\text{m}$ (un micrómetro). El tamaño de las partículas es extremadamente importante tanto para las contribuciones físicas como químicas.

- *Densidad aparente.* Este es sólo otro término para el peso unitario. La densidad aparente del microsilíce producido depende del metal que se produce en el horno y sobre cómo funciona el horno, porque la densidad aparente del microsilíce producido es generalmente muy bajo, no es muy económico para transportarlo a largas distancias.
- *Gravedad específica.* La gravedad específica es un número relativo que indica cómo el humo de sílice se compara con el agua, que tiene una gravedad específica de 1.0. El microsilíce tiene una gravedad específica de aproximadamente 2.2, que es algo más liviano que el cemento Portland. Así, añadiendo microsilíce a un concreto, la mezcla no “densificará” el concreto en términos de aumentar la densidad del concreto.
- *Superficie específica.* La superficie específica es el área total de la superficie de una masa dada de un material. Debido a que las partículas de humo de sílice son muy pequeñas, el área superficial es muy grande. Sabemos que la demanda de agua aumenta a medida que las partículas se vuelven más pequeños; lo mismo sucede con el humo de sílice. Este hecho es la razón por la que es necesario para usar el microsilíce en combinación con un aditivo reductor de agua o un superplastificante. Para determinar la superficie específica del microsilíce se realiza una prueba llamada método BET. Determinaciones específicas de superficies basadas en análisis de tamices no tienen sentido para el microsilíce.

Reacciones en el concreto.

Los beneficios de la adición de microsilíce al concreto son el resultado de los cambios que genera a su microestructura. Estos cambios son el resultado de dos diferentes, pero igualmente importantes, procesos. El primero de ellos es el aspecto físico de la sílice y el segundo es su contribución química. He aquí una breve descripción de ambos aspectos:

- *Contribuciones físicas.* La adición de microsilíce trae millones de partículas muy pequeñas a una mezcla de concreto. Así como el agregado fino llena los espacios entre las partículas de agregado grueso, el microsilíce llena los espacios entre los granos de cemento. Este fenómeno se conoce con frecuencia como empaquetado de partículas, micro-llenado o refinamiento de poros. Incluso si el microsilíce no

reaccionara químicamente, el efecto de micro-llenado produciría mejoras significativas en la naturaleza del concreto.

- *Contribuciones químicas.* Debido a su muy alto contenido de dióxido de silicio amorfo, el microsílíce es un material puzolánico muy reactivo en el concreto. A medida que el cemento Portland en el concreto comienza a reaccionar químicamente, libera hidróxido de calcio. El microsílíce reacciona con este hidróxido de calcio para formar un material aglutinante adicional llamado hidrato de silicato de calcio, que es muy similar al hidrato de silicato de calcio formado a partir de la reacción entre el cemento Portland y el agua (C-S-H). Es en gran medida este aglutinante adicional el que confiere al concreto con microsílíce sus mejoras en cuanto a propiedades mecánicas y de durabilidad.

En la **Figura 4** se muestra la microestructura de un concreto donde se puede apreciar el efecto físico-químico la microsílíce sobre la matriz, la cual se ve completamente refinada, así como la zona de transición interfacial.

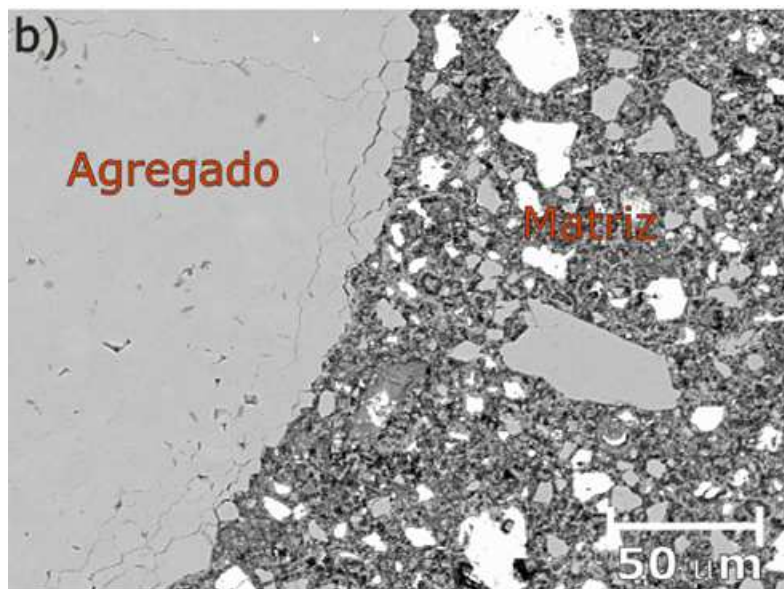


Figura 4 - Microestructura de concreto con microsílíce[28].

Efectos de la microsílice en el concreto fresco.

Aumento de la cohesión.

El concreto fresco elaborado con microsílice es más cohesivo y por lo tanto menos propenso a la segregación que el concreto sin microsílice. Para compensar este aumento de cohesión durante la colocación, el concreto con microsílice se coloca típicamente a una caída de 40 a 50 mm mayor que el concreto sin microsílice en la misma colocación. El principal beneficio de una mayor cohesión se puede ver en el concreto lanzado, ya sea para nuevas construcciones, reparación de estructuras existentes, revestimiento de taludes de tierra o apoyo al suelo en operaciones de excavación de túneles. El uso de microsílice en el concreto lanzado permite un mayor espesor de las capas de concreto y una reducción significativa del rebote. El concreto proyectado con microsílice frecuentemente incluye fibras de acero para proporcionar una mayor resistencia a la flexión. El microsílice es compatible con todos los acelerantes que se utilizan comúnmente en el concreto lanzado. Una vez que el concreto lanzado está en su lugar, todos los beneficios esperados del microsílice en el concreto entran en juego.

Un beneficio adicional es el aumento de la fuerza de adhesión del concreto lanzado con microsílice al material subyacente.

Reducción del sangrado.

Debido al área superficial muy alta del microsílice y a la usualmente muy baja contenido de agua del concreto con microsílice, habrá poco o ningún tipo de sangrado en el concreto con microsílice.

Una vez que se alcanza una adición de contenido de microsílice de alrededor del 5%, no se producirá sangrado en la mayoría de los concretos. El concreto sangra a medida que los componentes más pesados (cemento y agregados) se asientan bajo la influencia de la gravedad antes de que el concreto endurezca. Como los componentes más pesados se asientan, el agua más ligera es forzada hacia arriba. Parte del agua está atrapada bajo partículas de agregado o acero de refuerzo y parte del él llega a la superficie del concreto. Este movimiento del agua tiene lugar en los llamados canales o poros capilares del

concreto. Una vez que el agua se evapora, estos canales sirven como conductos para agentes agresivos como los iones cloruro de las sales de deshielo o del agua salada de mar, para volver a entrar en el concreto. Por lo tanto, la reducción o eliminación de estos canales por efecto del microsilíce mejoran la durabilidad del concreto.

Además de las mejoras en la durabilidad, la falta de sangrado permite un mejor proceso de acabado más eficiente que se utiliza con los trabajos de aplanado de concreto con microsilíce. Para concreto convencional, es crítico no llevar a cabo las operaciones de acabado hasta que todo el sangrado se ha detenido y toda el agua del sangrado se ha evaporado de la superficie del concreto en colocación. Así, hay generalmente un periodo de espera de varias horas después de la colocación inicial y los trabajos de acabado del concreto. Una vez que el agua de sangrado ha desaparecido y el concreto ha ganado suficiente resistencia, se inicia el acabado inicial.

Si el concreto con microsilíce no presenta sangrado, la operación de acabado del concreto puede ser continua desde la colocación hasta el texturizado y curado. Este enfoque se denomina “acabado de una pasada” o de “vía rápida” y es particularmente ventajoso en estructuras cuando es probable que se especifique la durabilidad del microsilíce, como en los tableros de puentes o estructuras de estacionamiento.

El microsilíce en el concreto endurecido.

Propiedades mecánicas mejoradas.

El microsilíce ganó la atención inicial en el mercado del concreto debido a su capacidad de producir con concreto con mayor resistencia a la compresión. También se observan mejoras en otras propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad o la resistencia a la flexión. Aunque el concreto ha sido especificado para tomar ventaja de las mejoras en estas otras propiedades, la propiedad de mayor interés es ciertamente la resistencia a la compresión.

El humo de sílice tiene la mayor parte de su impacto en la resistencia a la compresión en aproximadamente 28 días. Mientras que el concreto usualmente continuará ganando resistencia después de 28 días, la tasa de aumento de resistencia será mucho más lenta.

Permeabilidad reducida.

En muchas situaciones, la durabilidad del concreto está directamente relacionada con su permeabilidad. La principal contribución del microsílíce es reducir la permeabilidad del concreto y por consiguiente aumentar su durabilidad.

- *Daños de cloruros al acero de refuerzo.* La corrosión del acero de refuerzo es la causa más significativa y costosa del deterioro del concreto. El concreto con microsílíce se utiliza ampliamente en aplicaciones donde el concreto es expuesto a la sal de cualquier fuente. La permeabilidad reducida de este concreto puede resultar en muchos años de vida extendida para una estructura.
- *Ataques de sulfatos.* Mientras que la química del cemento Portland usado juega un papel importante en el ataque de sulfatos, se ha demostrado que la relación agua – materiales cementantes es también un factor crítico. Reduciendo la relación agua – material cementante se reduce efectivamente la permeabilidad del concreto. La adición de microsílíce reducirá aún más la permeabilidad, lo que provoca un mayor retraso de las reacciones adversas.
- *Ataque de ácido u otro ataque químico.* La resistencia general del concreto con microsílíce para el ataque de un producto químico agresivo no es significativamente diferente del concreto convencional de cemento Portland. Sin embargo, la permeabilidad reducida del concreto con microsílíce puede prolongar la vida útil de una estructura de concreto incrementando su durabilidad.

La reducción de la permeabilidad no es la única contribución del microsílíce a la durabilidad. Existe amplia evidencia que el microsílíce cuando se usa solo o junto con una ceniza volante adecuada, puede reducir o eliminar el potencial de reacción álcali-agregado cuando se usan agregados reactivos. Una vez más, se requerirían pruebas para determinar la cantidad y los tipos apropiados de materiales cementosos que se utilizarán para cada aplicación en particular.

Finalmente, la mayor resistencia del concreto con microsílíce añadirá una resistencia adicional a la abrasión. Para concreto elaborado con un agregado en particular, a mayor

resistencia a la compresión, mayor es la resistencia a la abrasión. El concreto con microsilíce de alta resistencia ha sido utilizado en aplicaciones tales como estaciones de rellenos sanitarios y proyectos de presas importantes.

Otra forma de ver la utilización del microsilíce en el concreto, es desde el punto de vista de la constructabilidad. Aquí, en realidad estamos cruzando la frontera entre los efectos del microsilíce en el concreto fresco y endurecido para aprovechar todos los aspectos del rendimiento del concreto con microsilíce, para facilitar los procesos constructivos en los proyectos de construcción. Ya se mencionaron algunos ejemplos, como son el “acabado en una sola pasada” al aprovechar la falta de sangrado en el concreto fresco y los beneficios en la utilización de concreto lanzado. Otros ejemplos son la reducción del calor de hidratación al utilizar microsilíce en la elaboración del concreto; la utilización de tres materiales cementosos, ya que cada vez se hace más hincapié en el uso de más materiales de desperdicio en la elaboración de concreto, tales como cenizas volantes y escoria de alto horno, sin embargo, la resistencia al envejecimiento prematuro del concreto puede verse afectada al utilizar estos materiales, no siendo el caso del microsilíce[30].

2.3.4. DURABILIDAD.

En las últimas décadas se la ha dado cada vez más importancia a las propiedades de durabilidad del concreto. La durabilidad en el concreto puede definirse de distintas formas:

- Según la norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999:

Es la capacidad del concreto hidráulico para uso estructural de resistir durante un tiempo determinado la acción ambiental, ataque químico, abrasión, corrosión del acero de refuerzo o cualquier otro proceso de deterioro para mantener su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas.

- Según la Instrucción española de Concreto Estructural (EHE):

La durabilidad de una estructura de concreto es su capacidad para soportar durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

- Según el ACI 365.1R-00 (ASTM E 632) (Estados Unidos):

Es la capacidad de mantener la serviciabilidad de un producto, componente, ensamble o construcción durante un tiempo especificado.

- NBR 6118, proyecto de estructuras de concreto – procedimiento (Brasil):

Consiste en la capacidad de la estructura de resistir las influencias ambientales previstas y definidas en conjunto por el autor del proyecto estructural y el contratista desde el inicio de los trabajos de elaboración del proyecto.

DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN DE UN CONCRETO DURABLE.

Es evidente que una estructura de concreto posiblemente será sometida a algún tipo de mantenimiento durante su vida útil, al ser tratada por un posible daño ocasionado por algún tipo de mecanismo de deterioro. Por otra parte, el diseño del concreto no gira únicamente en torno a la durabilidad ya que otras características serán requeridas para ello, como la resistencia a la compresión para satisfacer los requerimientos estructurales y funcionales de un elemento de concreto. En el tema de durabilidad es importante estudiar la forma en que las sustancias transportadas por agua o aire puedan penetrar por los recubrimientos de concreto en las estructuras, ya que estos procesos son fundamentales en cómo muchos aspectos de especificación para durabilidad del concreto han sido desarrollados.

Concreto como un medio permeable.

a) Porosidad.

El concreto cuando está en estado seco es un material poroso, una proporción de su interior es ocupada por espacios vacíos. La mayoría de la porosidad está, bajo circunstancias normales, en la matriz cementante. Esta porosidad puede ser dividida en términos de dimensiones en dos principales categorías: porosidad capilar y porosidad de gel.

La porosidad capilar es el espacio dejado entre las partículas de cemento y típicamente tiene dimensiones de alrededor de 1 μm de diámetro. Está definida principalmente por la relación agua – cemento de la mezcla del concreto, el grado de hidratación del cemento y la distribución de los tamaños de las partículas del cemento. Cuanto mayor sea el volumen de

agua en relación con el del cemento, mayor será el espacio entre las partículas de cemento, por lo tanto, una baja relación agua – cemento y un alto grado de hidratación del cemento conducirán a menores volúmenes de porosidad total y menores diámetros de poros (ver **Figura 5**).

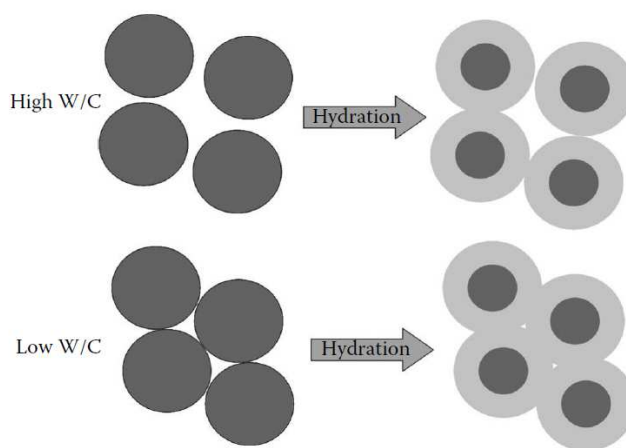


Figura 5 - Influencia de la relación agua - cemento en la porosidad capilar del concreto.

El tamaño de las partículas también juega un papel importante. Las partículas más grandes tendrán mayores volúmenes de porosidad capilar e incrementarán los diámetros de poros, aunque éstos estén muy unidos entre sí, por lo tanto, la presencia de partículas más finas en los espacios entre las partículas más grandes actúa para refinar la porosidad (ver **Figura 6**).

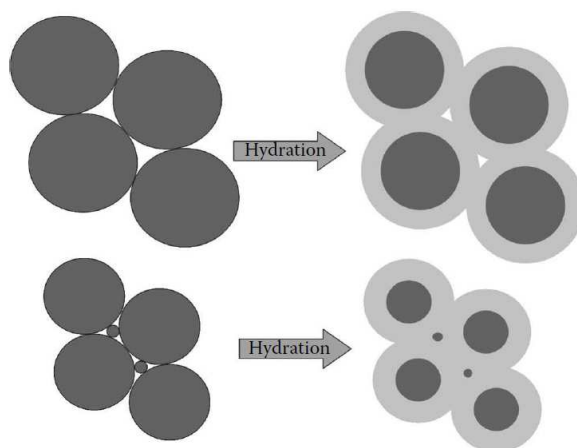


Figura 6 - Influencia del tamaño de las partículas en la porosidad capilar[9].

El principal producto de la hidratación del cemento, el gel CSH, contiene poros con diámetros entre 1 a 100 nanómetros de rango. Así, a medida que avanza la hidratación del cemento, la proporción de porosidad capilar es reducida mientras que la porosidad de gel aumenta. A diferencia de la porosidad capilar, es mucho más complicado la medición de la porosidad de gel, aun así, distintas técnicas han sido desarrolladas para ello sin embargo todavía es tema de debate si realmente éstas son representativas. Una de estas técnicas es la porosimetría por inyección de mercurio.

Otro factor que influencia la porosidad del concreto es la naturaleza de la interface entre la pasta de cemento y las partículas de agregados, conocida como Zona de Transición Interfacial (ZTI), la cual tiene mayor porosidad que la pasta de cemento endurecido. La ZTI es el resultado del “efecto pared” (ver **Figura 7**), donde las partículas de cemento localizadas contra la superficie de una partícula de agregado se empaquetan de forma menos eficiente que en cualquier otro lugar, lo que lleva a un mayor volumen de porosidad capilar y a diámetros de poros más grandes en esta zona. Aunque la Zona de Transición Interfacial (ZTI) ciertamente contribuye a las propiedades de permeabilidad del concreto, los estudios de su influencia general comparada con la de la porosidad en el cemento en general y de las microfisuras indican que la contribución es relativamente pequeña[9]. En cuanto a la adición de microsílice en el concreto éste ha demostrado ser un material muy efectivo en la reducción del espesor de la Zona de Transición Interfacial entre el agregado y el matriz cementante del concreto. Diversos estudios utilizando ensayos de porosimetría con microscopio electrónico de barrido (SEM) han demostrado que sustituyendo 10% de microsílice por cemento causa una reducción de hasta un 36% de la Zona de Transición Interfacial contribuyendo así al mejoramiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto[31].

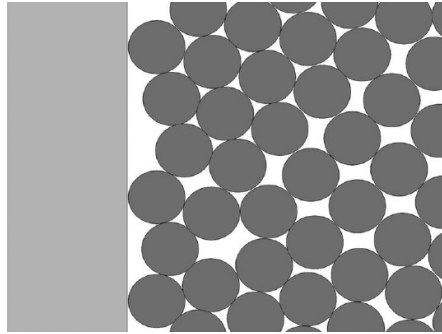


Figura 7 - Representación del "efecto pared" en el concreto[9].

b) Grietas.

Desde el punto de vista de la durabilidad, las grietas en el concreto son importantes por dos razones principales. En primer lugar, la presencia de grietas permitirá la entrada de sustancias perjudiciales para el concreto o su armadura a un ritmo más rápido que de otro modo. En segundo lugar, la aparición de macrofisuras de anchura suficiente marca el final de la utilización de una estructura.

c) Absorción.

Cuando un tubo estrecho (capilar) entra en contacto con la superficie de un líquido, las fuerzas intermoleculares entre las dos sustancias actuarán para atraer el líquido hacia él, este proceso es referenciado como capilaridad o acción capilar. La matriz de cemento endurecido del concreto (y del agregado donde es poroso) es más compleja que lo descrito anteriormente, ya que los poros están altamente interconectados y son de composición superficial y radio variables. La absorción debe ser tomada en cuenta como factor que puede afectar la durabilidad del concreto.

d) Flujo.

La tasa de flujo de un fluido hacia el concreto bajo una diferencia de presión dada depende de la permeabilidad del material y en ciertos casos puede afectar la durabilidad del concreto.

e) Difusión.

Ciertas interacciones como el agrietamiento o la precipitación de los productos de reacción del concreto, pueden causar cambios en la porosidad, la cual a su vez puede causar cambios en la microestructura del concreto. Estos cambios producirán un cambio en el coeficiente de difusión con el tiempo.

En ausencia de grietas, el coeficiente de difusión de una sustancia en el concreto depende en gran medida de la naturaleza de su porosidad. A medida que el tamaño máximo de los poros se aproxima al tamaño mínimo, conduce a mayores coeficientes de difusión afectando la durabilidad del concreto.

Cemento.

Las principales propiedades de los materiales utilizados como constituyentes de la fracción de cemento del concreto que influyen en la durabilidad, son su composición química, la distribución del tamaño de las partículas y la cinética de reacción, así como la contribución a la resistencia que estas reacciones producen. Elegir el tipo de cemento correcto (y sus adiciones) es un factor muy importante para la durabilidad de un concreto.

Agregados.

En muchos aspectos de la durabilidad del concreto, el agregado juega un papel importante. No sólo está envuelto directamente en ciertos procesos que comprometen la durabilidad, sino también pueden introducir sustancias químicas como cloruros, sulfatos o álcalis que pueden contribuir a otros problemas. También su tipo, tamaño y forma pueden afectar directamente la Zona de Transición Interfacial del concreto.

Aditivos.

Un buen número de aditivos para uso en el concreto tienen capacidades específicas para incrementar su durabilidad. Otros imparten características a concretos que tienen aplicaciones más generales, pero que puede ser utilizados para mejorar la durabilidad en un determinado caso.

Fibras.

Las fibras pueden ayudar a proporcionar una resistencia adicional al concreto, la cual puede contribuir enormemente a disminuir la aparición de grietas e incrementar hasta cierto punto la resistencia a la compresión y tensión. Esto aporta beneficios protegiendo el concreto y su armadura contra el ingreso de sustancias químicas hacia su interior contribuyendo así a una mayor durabilidad[9].

2.3.5. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

NÚMERO DE REBOTE MEDIANTE ESCLERÓMETRO.

El procedimiento de este ensayo se lleva a cabo para determinar el índice de rebote en el concreto endurecido mediante el empleo del dispositivo conocido como esclerómetro o martillo de rebote, para evaluar la uniformidad superficial del concreto comparándolo con un concreto de resistencia conocida.

Este método tiene sus desventajas, ya que por ejemplo la zona de prueba debe tener por lo menos 150 mm de diámetro y 100 mm de espesor, para evitar lecturas erróneas debido a la elasticidad de la pieza. Todos los elementos sueltos deben fijarse rígidamente para efectuar la prueba para que los parámetros arrojados en el ensayo sean lo más representativo posibles. Deben elegirse las superficies de prueba de acuerdo a la representatividad del área por evaluar, en función de sus oquedades, desconchamiento, alta porosidad o textura rugosa. Cuando se desean compara las características de dos elementos, estos deben tener aproximadamente la misma edad y condiciones de humedad.

La norma NMX C-192-ONNCCE-2006 nos dice que el método se emplea para evaluar comparativamente la resistencia del concreto, pero se recomienda que sea utilizado como una alternativa para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto endurecido[32].

FRECUENCIA FUNDAMENTAL TRANSVERSAL.

Este método se utiliza como su nombre lo indica, para determinar la frecuencia fundamental transversal de prismas y cilindros de concreto con el propósito de calcular el módulo dinámico de elasticidad de Young.

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

La comparación de los resultados de especímenes de concreto de diferentes tamaños o formas, debe realizarse con precaución debido a que se pueden calcular valores diferentes para el módulo dinámico de elasticidad como resultados de la gran variedad de frecuencias de resonancia que se registran en especímenes de diferentes tamaños y formas, elaboradas con el mismo concreto.

El módulo dinámico de elasticidad o módulo de Young (E), para un esfuerzo uniaxial cuando todos los esfuerzos salvo uno el normal son nulos, puede definirse como una constante de proporcionalidad que relaciona este esfuerzo normal con su deformación lineal[33].

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

Antes de definir resistividad eléctrica es importante hablar de la corrosión del acero de refuerzo, el cual es uno de los problemas patológicos que más afectan la vida de servicio de las estructuras de concreto. Existen varios métodos para medir la corrosión y únicamente la interpretación simultánea de varios de ellos conduce a un adecuado dictamen sobre el grado de deterioro. Uno de los métodos cualitativos e indirectos para valorar el estadio de deterioro por corrosión de una estructura de concreto es de resistividad eléctrica. Este método es económico, rápido de interpretar y no requiere de un trabajo exhaustivo previo. Sus resultados aportan datos para valorar el nivel de corrosión y evaluar el riesgo de daño.

Para realizar la prueba de resistividad, se deben tomar ciertas precauciones generales como determinar previamente la profundidad de carbonatación del elemento por ensayar; no se debe determinar la resistividad eléctrica en elementos carbonatados porque los resultados

varías de forma sustancial y tener en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros para determinar la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, por lo tanto, no debe considerarse como criterio único para definir o prever un posible daño sobre la estructura. Según la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016, se recomienda llevar el criterio de evaluación de la **Tabla 4**[34].

Tabla 4 - Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto usando los métodos directo y de Wenner (en medios finitos)[34].

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

VELOCIDAD DE PULSO.

El método utilizado nos sirve para determinar la velocidad de pulso en la propagación de ondas ultrasónicas longitudinales en concreto. No aplica para la propagación de otro tipo de vibraciones dentro del concreto.

En el procedimiento de esta prueba, las pulsiones de las ondas son generadas por un transductor electroacústico (transmisor) que se mantiene en contacto con la superficie del concreto a probar. Después de atravesar el concreto, las pulsiones son recibidas y se convierten en energía eléctrica por un segundo transductor (receptor), localizado a una distancia “D” del transductor transmisor. El tiempo de recorrido “T” se mide electrónicamente y la velocidad del pulso “V” se calcula dividiendo “D/T”.

Este método puede usarse para verificar la uniformidad y calidad relativa del concreto, para indicar la presencia de vacíos y grietas y estimar la profundidad de las mismas, así como, para detectar cambios en las propiedades del concreto.

Según la norma NMX-C-275-ONNCCE-2004, los resultados obtenidos por este método no se recomiendan para ser considerados como una alternativa para determinar la resistencia a compresión, ni como un medio para obtener el módulo de elasticidad en el concreto. El concepto medido por este método es el tiempo de tránsito de una onda ultrasónica longitudinal que pasa a través del concreto y se reporta como la velocidad a la que las ondas viajan a través del mismo[35]. La norma NMX-C-275-ONNCCE-2004, nos menciona ciertos parámetros de referencia para interpretar los resultados de esta prueba, los cuales se reflejan en la **Tabla 5**.

Tabla 5 – Criterio de referencia para los parámetros de velocidad de pulso en el concreto[35].

Velocidad de pulso	Criterio
Inferior a 1.7 km/s	Muchos vacíos o agrietamiento alto en el concreto
Entre 1.78 a 2.35 km/s	Algunos vacíos o agrietamiento medio en el concreto
Superior a 2.35 km/s	Pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo en el concreto

MIGRACIÓN DE CLORUROS.

La principal aplicación del método colorimétrico es la determinación de la profundidad del frente de penetración de cloruros que ingresan en el concreto por los fenómenos de la absorción asociada a la difusión.

Cuando la solución de nitrato de plata es rociada en la superficie del concreto, ocurre una reacción fotoquímica. Donde hay presencia de cloruros libres ocurre la formación de un precipitado blanco de cloruro de plata. En la región sin cloruros o con cloruros combinados hay formación de un precipitado marrón u óxido de plata. Por ello, como el frente de penetración de cloruros nano es regular, esto puede modificar las medidas de profundidad de ingreso de los cloruros. En el caso que los cloruros estén insertos en la matriz del concreto, la visualización puede volverse un poco más difícil.

Como la penetración de cloruros no es uniforme, la NT BUILD 492 recomienda realizar siete medidas a cada 10 mm, siendo el resultado el promedio entre todas ellas. En caso de no poderse dar lectura por la presencia de agregados, se debe alterar hasta el punto de la medición o ignorar esta profundidad si hay otras cinco válidas[36; 37].

2.4. MARCO LEGAL.

Los trabajos realizados se desarrollaron atendiendo las normas y especificaciones vigentes mexicanas para cada ensayo y/o procedimiento, las cuales son las siguientes:

Normativa mexicana	Ensayo y/o requerimiento
NMX-C-152-ONNCCE-2015	Peso específico del cemento
NMX-C-030-ONNCCE-2004	Muestreo de agregados
NMX-C-170-1997-ONNCCE	Reducción de las muestras de agregados
NMX-C-077-1997-ONNCCE	Análisis granulométrico de los agregados
NMX-C-164-ONNCCE-2014	Densidad y absorción del agregado grueso
NMX-C-165-ONNCCE-2014	Densidad y absorción del agregado fino
NMX-C-073-ONNCCE-2004	Masa volumétrica de agregados

Normativa mexicana	Ensayo y/o requerimiento
NMX-C-166-ONNCCE-2006	Contenido de agua en agregados
NMX-C-156-ONNCCE-2010	Revenimiento del concreto fresco
NMX-C-435-ONNCCE-2004	Temperatura
NMX-C-192-ONNCCE-2006	Número de rebote mediante esclerómetro
NMX-C-089-1997-ONNCCE	Módulo de elasticidad dinámico
NMX-C-514-ONNCCE-2016	Resistividad eléctrica
NMX-C-275-ONNCCE-2004	Velocidad de pulso por ultrasonido
NMX-C-083-ONNCCE-2014	Resistencia a la compresión
NMX-C-191-ONNCCE-2015	Resistencia a la flexión
NMX-C-128-ONNCCE-2013	Módulo de elasticidad estático
NMX-C-263-ONNCCE-2010	Porosidad
NMX-C-161-ONNCCE-2013	Muestreo del concreto fresco
NMX-C-159-ONNCCE-2016	Elaboración y curado de especímenes
NMX-C-148-ONNCCE-2010	Condiciones de operación y almacenamiento probetas
NMX-C-109-ONNCCE-2013	Cabeceo especímenes
NMX-C-469-ONNCCE-2013	Uso de casquetes no adheridos en cilindros
NT BUILD 492	Coeficiente de migración de cloruros

3. PROYECTO DE INTERVENCIÓN.

3.1. OBJETIVOS GENERALES.

- a. Desarrollar e implementar diagramas de interacción entre las principales propiedades del concreto.
- b. Desarrollar e implementar diagramas de interacción entre resultados de ensayos destructivos y no destructivos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Diseñar y proporcionar mezclas de concreto con diferentes relaciones agua – cemento para concreto convencional y con adición de microsílice.
- Realizar ensayos al concreto en estado fresco.
- Realizar ensayos al concreto endurecido mediante:
 - Ensayos no destructivos.
 - Ensayos destructivos.
- Desarrollar diagramas de interacción que relacionen las propiedades del concreto.
- Desarrollar diagramas de interacción que relacionen los métodos destructivos y no destructivos.
- Implementar los diagramas de interacción mediante la programación y difusión de una aplicación móvil digital.

3.3. JUSTIFICACIÓN.

El concreto es el material más importante de industria de la construcción y ha sido objeto de innumerables investigaciones. Con el emprendimiento de proyectos de construcción cada vez más complejos y que significan un mayor reto para el ingeniero civil y el constructor, es muy importante conocer y predecir el comportamiento las propiedades del concreto para así diseñar y construir estructuras de concreto más seguras, sostenibles y mayor durabilidad.

Es por ello que en esta investigación se estudia el comportamiento de algunas propiedades del concreto, elaborando mezclas con insumos locales para así verificar si las variables en estudio están relacionadas o no. Esto nos será de gran utilidad para comparar y predecir propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto mediante el desarrollo de diagramas de interacción, con distintas relaciones agua – material cementante.

Hoy en día todo proyecto de ingeniería debe ser durable, con costos de mantenimiento bajos y a su vez sostenible con el medio ambiente. Por esto, además de utilizar concreto convencional se aprovechará un residuo como el microsílice como adición a un segundo grupo de mezclas, para estudiar y aprovechar los beneficios que éste aporta tanto al concreto en estado fresco como endurecido.

Es importante destacar, que las condiciones actuales de los materiales utilizados en la construcción son altamente variables y que en ocasiones no existe información respecto a las especificaciones del concreto debido a que no se llevó algún tipo de control [38]. También es posible que la información que respecta al control de calidad de materiales de una construcción ya no exista. Lo anterior, obliga a realizar ensayos no destructivos, que permitan obtener información para dictaminar las condiciones de servicio de la estructura que sea objeto de estudio. Es importante subrayar que los ensayos no destructivos en ningún momento deberán sustituir a los ensayos destructivos, ya que estos últimos tienen un margen de error menor, además que en ciertos casos los resultados de ensayos no destructivos dependen de algunos factores para obtener una buena confiabilidad.

La principal ventaja de los ensayos no destructivos es que generan un menor daño a la estructura donde se realizan, reduciendo tiempo, esfuerzo y costo, además de que permiten realizar ensayos en estructuras donde no se puedan ejecutar perforaciones tales como paredes delgadas o en concreto densamente reforzado. Sin embargo, es importante relacionarlos con ensayos destructivos para cada tipo de concreto, lo cual incrementará la confiabilidad de su uso, por esto se vuelve útil y necesario existan correlaciones entre las propiedades del concreto obtenidas tanto por métodos no destructivos y destructivos [39].

3.4. METODOLOGÍA.

3.4.1. DISEÑO Y PROPORCIONAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO.

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

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

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

El proporcionamiento de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las

características especificadas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco.
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido.
- Economía.

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades citadas arriba se pueden alcanzar en la construcción de concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla[40-42].

3.4.1.1. ELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA.

Antes que se pueda determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerándose el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (tales como resistencia a la congelación y resistencia mecánica) requeridas para la estructura. Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, se debe verificar la resistencia a los iones cloruros y se deben especificar los métodos de ensayos apropiados.

Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua – material cementante apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias. Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posibles, pues un número excesivo de ingredientes normalmente dificulta el control del concreto [27].

3.4.1.1.1. RELACIÓN ENTRE RESISTENCIA Y RELACIÓN AGUA – MATERIAL CEMENTANTE.

La resistencia (compresión o flexión) es el indicador de calidad del concreto más universalmente utilizado. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades, tales como durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste se reconocen hoy en día como

igual importancia o, en algunos casos, de mayor importancia, especialmente cuando se considera el ciclo de vida de la estructura[27].

Dentro del rango normal de resistencias usadas en la construcción de concreto, la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua – cemento o agua – material cementante. Para concretos totalmente compactados, producidos con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades requeridas del concreto, bajo las condiciones de obra, se gobiernan por la cantidad del agua de mezcla usada por unidad de cemento o material cementante[40].

La resistencia de la pasta cementante en el concreto depende de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el tiempo, desde que la temperatura y la humedad disponibles sean adecuadas. Por lo tanto, la resistencia en cualquier edad es función tanto de la relación agua – material cementante original y del grado de hidratación del material cementante. La importancia del curado temprano y minucioso se reconoce fácilmente.

La diferencia en la resistencia del concreto para una dada relación agua – cemento puede resultar de:

1. Cambios del tamaño, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez del agregado.
2. Diferencias en los tipos y fuentes del material cementante.
3. Contenido de aire incluido (incorporado).
4. La presencia de aditivos.
5. Duración del curado[27].

3.4.1.1.2. RESISTENCIA.

La resistencia a compresión especificada (característica), f'_c a los 28 días, es la resistencia que el promedio de cualquier conjunto de tres ensayos consecutivos de resistencia debe lograr o superar. El ACI 318 requiere que f'_c sea por lo menos 180 kg/cm^2 (17.5 MPa o 2500 lb/pulg²). Ninguna prueba individual (promedio de dos cilindros) puede tener resistencia de

36 kg/cm² o 3.5 MPa (500 lb/pulg²) inferior a la resistencia especificada. Los especímenes se deben curar bajo las condiciones de laboratorio para una determinada clase de concreto[43]. Algunas especificaciones permiten rangos alternativos.

El promedio de resistencia (resistencia media) debe ser igual a la resistencia especificada más una tolerancia que lleva en consideración las variaciones de los materiales, de los métodos de mezclado, del transporte y colocación del concreto y variaciones en la producción, curado y ensayo de probetas cilíndricas de concreto. La resistencia media, que es mayor que f'_c se llama f'_{cr} , y es la resistencia requerida en el diseño de la mezcla. La **Tabla 6** y **Tabla 7** la muestran los requisitos de resistencia para varias condiciones de exposición.

En proyectos de pavimentos, la resistencia a flexión se usa, algunas veces, en lugar de la resistencia a compresión. Sin embargo, la resistencia a flexión se evita debido a su gran variabilidad[27].

Tabla 6 - Relación agua - material cementante máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición[43].

Condición de exposición	Relación agua-material cementante máxima por masa de concreto	Resistencia a compresión de diseño mínima f'_c , kg/cm ² (MPa) [lb/pulg ²]
Concreto protegido de la exposición a congelación-deshielo, de la aplicación de sales de deshielo o de sustancias agresivas	Elija la relación agua-material cementante basándose en la resistencia, trabajabilidad y requisitos de acabado	Elija la resistencia basándose en los requisitos estructurales
Concreto que se pretende que tenga baja permeabilidad cuando expuesto al agua	0.50	280 (28) [4000]
Concreto expuesto a congelación-deshielo en la condición húmeda y a descongelantes	0.45	320 (31) [4500]
Para protección contra la corrosión del refuerzo (armadura) del concreto expuesto a cloruro de las sales descongelantes, agua salobra, agua del mar o rociado de estas fuentes.	0.40	350 (35) [5000]

Tabla 7 - Requisitos para el concreto expuesto a los sulfatos del suelo y del agua[43].

Exposición a sulfatos	Sulfatos solubles en agua (SO ₄) presentes en el suelo, porcentaje en masa **	Sulfatos (SO ₄) en el agua, ppm**	Tipo de cemento ***	Relación agua-material cementante, máxima en masa	Resistencia a compresión de diseño mínima, f'_c kg/cm ² MPa [lb/pulg ²]
Insignificante	Menor que 0.10	Menor que 150	Ningún tipo especial necesario	—	—
Moderada†	0.10 a 0.20	150 a 1500	Cemento de moderada resistencia a sulfatos	0.50	280 (28) [4000]
Severa	0.20 a 2.00	1500 a 10,000	Cemento de alta resistencia a sulfatos	0.45	320 (31) [4500]
Muy severa	Mayor que 2.00	Mayor que 10,000	Cemento de alta resistencia a sulfatos	0.40	360 (35) [5000]

* Adaptada del ACI 318

** Ensayados de acuerdo con el Método de Determinación de la Cantidad de Sulfatos Solubles en Sólido (Suelo y Rocas) y Muestras de Agua, Departamento de Recursos Hídricos Norteamericano (U.S. Bureau of Reclamation), Denver, 1977.

*** Cementos ASTM C 150 (AASHTO M 85) tipos II y V, ASTM C 1157 tipos MS y HS, ASTM C 595 (AASHTO M 240) tipos I(SM), IS, P, IP. Los cementos en Argentina son CPN (ARS), CPN (ARI, MRS), CPP (BCH, ARS, RRAA), ARS, CPC (ARS) (IRAM 50000 y IRAM 50001). Los cementos en Chile son el siderúrgico y el puzolánico (Nch 148). Los cementos en Colombia son los tipos 2 y el 1M (NTC 121, 321). En Costa Rica, los cementos son tipo II, V (NCR40). En el Ecuador los cementos son tipo II (INEN 151, 152). En México, cementos tipo CPO-RS, CPEG, CPC (NMX – C – 414 – ONNCCE). En Perú, cementos tipo II, MS y V (NTP 334.009, 334.082 y 334.090). En Venezuela, cementos tipo II, V, CPPZ1, CPPZ2, CPPZ3 (COVENIN 28 y 3134). Las puzolanas y escorias que, a través de ensayos o registros de servicio, se mostraron eficientes en la mejoría de la resistencia a los sulfatos también se pueden usar.

† Agua del mar.

3.4.1.1.3. RELACIÓN AGUA – MATERIAL CEMENTANTE.

La relación agua – material cementante es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento Portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, microsílíce y puzolanas naturales). La relación agua – material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas.

Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua – material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión. En estos casos, la relación agua – material cementante y las proporciones de la mezcla para la resistencia requerida se deben basar en datos de campo adecuados o en mezclas de prueba que empleen los materiales de la obra, a fin de que se determine la relación entre la resistencia y la relación agua – material cementante. Cuando no se disponga de más datos, se pueden utilizar la **Figura 8** y **Tabla 8** la para elegir la relación agua – material cementante, con base en el promedio requerido de la resistencia, f'_{cr} para mezclas de pruebas[27].

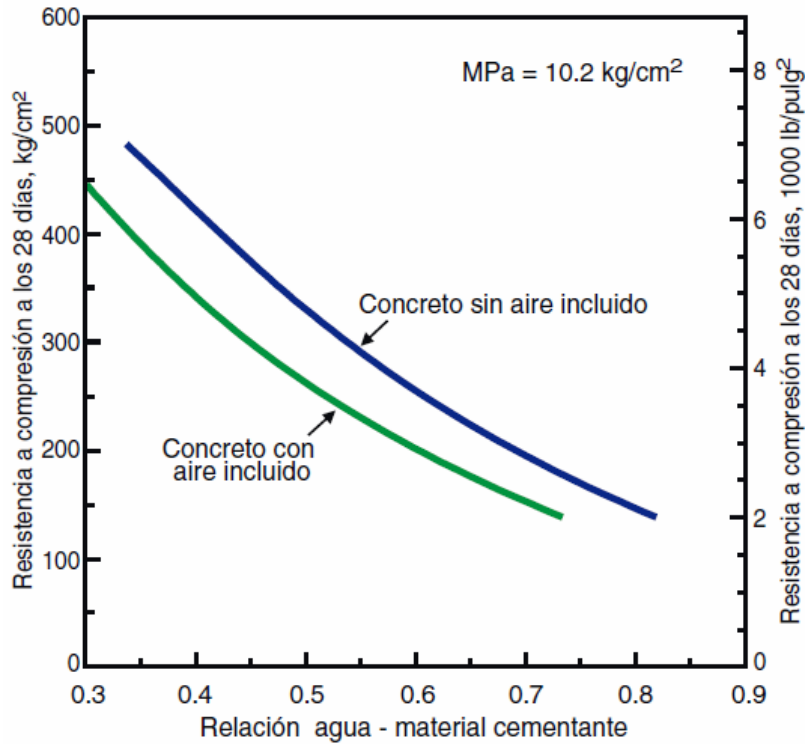


Figura 8 - Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua - material cementante para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19mm a 25 mm (3/4 a 1 pulg.). La resistencia se basa en cilindros curados por 28 días en ambiente húmedo.[44-47].

Tabla 8 - Dependencia entre la relación agua - material cementante y la resistencia a la compresión del concreto. La resistencia se basa en cilindros sometidos al curado húmedo por 28 días. La dependencia asume el agregado con un tamaño máximo nominal de 19 a 25 mm[44; 45; 48].

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38 (0.38)	0.31 (0.30)
400 (40)	0.43 (0.42)	0.34 (0.34)
350 (35)	0.48 (0.47)	0.40 (0.39)
300 (30)	0.55 (0.54)	0.46 (0.45)
250 (25)	0.62 (0.61)	0.53 (0.52)
200 (20)	0.70 (0.69)	0.61 (0.60)
150 (15)	0.80 (0.79)	0.72 (0.70)

En el diseño de mezclas, la relación agua – material cementante, a/mc , se usa frecuentemente como sinónimo de la relación agua – cemento (a/c). Sin embargo, algunas especificaciones diferencian las dos relaciones. Tradicionalmente, la relación agua – cemento se refiere a la relación agua – cemento Portland o agua – cemento adicionado[27].

3.4.1.1.4. AGREGADOS.

Dos características de los agregados tienen una influencia importante en el proporcionamiento de las mezclas de concreto porque afectan la trabajabilidad del concreto fresco:

- Granulometría (tamaño y distribución de las partículas).
- Naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura de la superficie).

La granulometría es importante para que se logre una mezcla económica, pues afecta la cantidad de concreto que se puede producir para una dada cantidad de material cementante y agua. Los agregados gruesos deben tener el mayor tamaño máximo posible para las condiciones de la obra. El tamaño máximo que se puede usar depende de factores tales como la forma del miembro de concreto que se va a colar, la cantidad y la distribución del acero de refuerzo (armadura) en el miembro y el espesor de la losa. La granulometría también influye en la trabajabilidad y la facilidad de colocación del concreto. Algunas veces, hay carencia del agregado de tamaño mediano, cerca de 9.5 mm (3/8 pulg.), en el suministro de agregado. Esto puede resultar en un concreto de alta contracción, demanda elevada de agua y baja trabajabilidad. Su durabilidad también se puede afectar. Hay muchas opciones para obtenerse una granulometría ideal del agregado [42].

El tamaño máximo del agregado grueso no debe exceder un quinto de la menor dimensión entre los lados de las cimbras (encofrados), ni tampoco, tres cuartos la distancia libre entre las varillas o cables de refuerzo individual, paquetes de varillas o tendones o ductos de presfuerzo (pretensado, presforzado, precomprimido). También es una buena práctica limitar el tamaño del agregado para que no supere tres cuartos del espacio libre entre el refuerzo y la cimbra. En losas sobre el terreno sin refuerzo, el tamaño máximo del agregado no debería exceder un tercio del espesor de la losa. Se pueden usar tamaños menores cuando la disponibilidad o alguna consideración económica lo requieran.

La cantidad de agua de mezcla necesaria para producir un volumen unitario de concreto, para un dado revenimiento (asentamiento), depende de la forma, del tamaño máximo y de la cantidad de agregado grueso. Los tamaños mayores minimizan los requisitos de agua y, por lo tanto, permiten la disminución del contenido de cemento. Un agregado redondeado requiere menos agua de mezcla que un agregado triturado, en concretos con el mismo revenimiento.

El tamaño máximo del agregado grueso que producirá el concreto con la mayor resistencia, para un dado contenido de cemento, depende de la fuente del agregado, bien como de su forma y granulometría. En el concreto de alta resistencia (mayor que 700 kg/cm^2 , 70 MPa o 10000 lb/pulg^2), el tamaño máximo es cerca de 19 mm ($3/4 \text{ pulg.}$). Las resistencias más elevadas también se pueden lograr con el empleo de piedra triturada en vez de grava redondeada.

La granulometría más deseada para el agregado fino dependerá del tipo de obra, del contenido de la pasta de la mezcla y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, se desea una granulometría fina (módulo de finura más bajo) para lograrse una buena trabajabilidad. En mezclas más ricas, se usa una granulometría más gruesa (mayor módulo de finura) para aumentar la economía.

En algunas áreas, los cloruros químicamente adheridos al agregado pueden dificultar que el concreto cumpla con los límites del ACI 318 u otras especificaciones. Sin embargo, parte o hasta incluso todos los cloruros en los agregados pueden no estar disponibles para la corrosión del acero de refuerzo y, por lo tanto, aquellos cloruros se deben ignorar[27].

El volumen agregado grueso se puede determinar a través de la **Tabla 9** o de la **Figura 9**. Estos volúmenes se basan en agregados en la condición varillados en seco[49; 50]. Se los eligen a través de relaciones empíricas a fin de que se produzca un concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para la construcción de concreto reforzado (armado) en general. Para concretos menos trabajables, tales como los necesarios en la construcción de pavimentos, el volumen de agregado se puede aumentar en cerca de 10%. Para concretos más trabajables, tales como los necesarios para el bombeo, el volumen se puede reducir en hasta 10% [27].

Tabla 9 - Volumen de Agregado Grueso por Volumen Unitario de Concreto. Los volúmenes se basan en agregados varillados en seco[44; 49].

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

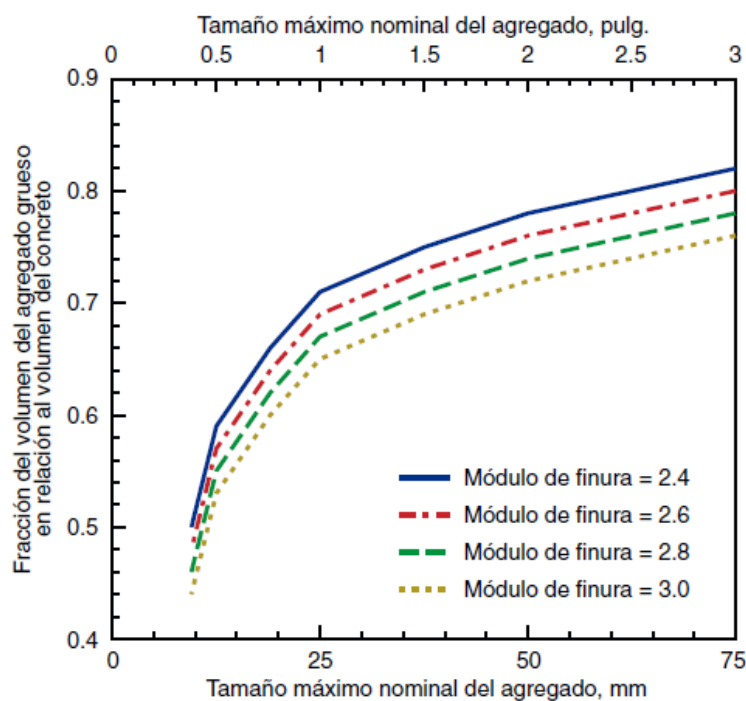


Figura 9 - Volumen del agregado grueso por unidad de volumen de concreto. Los volúmenes se basan en agregados en la condición varillados en seco[41; 44; 46; 49].

3.4.1.1.5. REVENIMIENTO.

Siempre se debe producir el concreto para que tenga trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas con las condiciones de la obra. La trabajabilidad es la medida de la facilidad o de la dificultad de colocación, consolidación y acabado del concreto. La consistencia es la habilidad del concreto de fluir. Plasticidad es la facilidad de moldeo del concreto. Si se usa más agregado en el concreto o si se adiciona menos agua, la mezcla se vuelve más rígida (menos plástica y menos trabajable) y difícil de moldearse. Ni las mezclas muy secas y desmoronables, ni las muy aguadas y fluidas se pueden considerar plásticas.

El ensayo de revenimiento (asentamiento) se usa para medir la consistencia del concreto. Para una dada proporción de cemento y agregado, sin aditivos, cuanto mayor el revenimiento, más húmeda es la mezcla. El revenimiento es un indicador de trabajabilidad cuando se evalúan mezclas similares. Sin embargo, no se lo debe utilizar para comparar mezclas de proporciones totalmente diferentes. Si se lo usa en diferentes revolturas (bachadas, amasadas) del mismo diseño de mezcla, un cambio en el revenimiento indica un cambio en la consistencia y en las características de los materiales, de las proporciones de la mezcla, del contenido de agua, del mezclado, del tiempo del ensayo o de la propia prueba.

Son necesarios diferentes valores de revenimientos para los varios tipos de construcción. Generalmente, se indica el revenimiento en la especificación de la obra como un rango, como de 50 a 100 mm o como un valor máximo que no se debe exceder. La ASTM C 94 presenta en detalles las tolerancias para el revenimiento, un valor aproximado se puede elegir en la **Tabla 10** para la consolidación mecánica del concreto. En el ajuste de la mezcla, se puede aumentar el revenimiento en cerca de 10 mm con la adición de 2 kilogramos de agua por metro cúbico de concreto[27].

Tabla 10 - Revenimientos recomendados para varios tipos de construcción (Se puede aumentar 25 mm para los métodos de consolidación manuales, tales como varillado o picado. Los plastificantes pueden proveer revenimientos mayores)[44].

Construcción de Concreto	Revenimiento mm (pulg.)	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzado	75 (3)	25 (1)
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas	75 (3)	25 (1)
Concreto masivo	75 (3)	25 (1)

3.4.1.1.6. CONTENIDO DE AGUA.

El contenido de agua se influencia por un gran número de factores: tamaño, forma y textura del agregado, revenimiento, relación agua – material cementante, contenido de agua, tipo y contenido de material cementante, aditivos y condiciones ambientales. Un aumento del contenido de aire y del tamaño del agregado, una reducción de la relación agua – material cementante y del revenimiento o el uso de agregados redondeados, de aditivos reductores de agua o de ceniza volante reducirá la demanda de agua. Por otro lado, el aumento de la temperatura, del contenido de cemento, del revenimiento, de la relación agua – cemento, de la angularidad del agregado y la disminución de la proporción entre el agregado grueso y el agregado fino aumentarán la demanda de agua[27].

El contenido de agua aproximado de la **Figura 10**, usado en el proporcionamiento, son para el agregado angular (piedra triturada). Para algunos concretos y agregados, la estimativa de la **Figura 10** se puede reducir aproximadamente 10 kg/m³ para el agregado subangular, 20 kg/m³ para grava con algunas partículas trituradas y 25 kg/m³ para grava redondeada, para que se obtenga el revenimiento enseñado. Esto muestra la necesidad de las mezclas de prueba

para los materiales locales, pues cada fuente de agregado es diferente y puede afectar de manera diversa las propiedades del concreto.

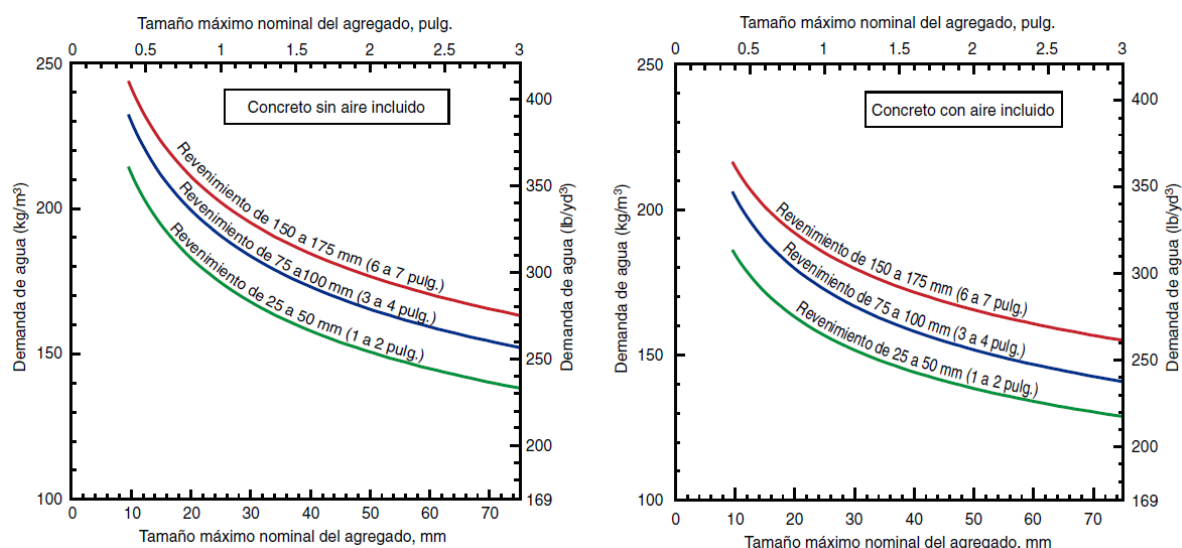


Figura 10 - Demanda de agua aproximada para varios revenimientos y tamaños de agregados triturados para concreto sin aire incluido (izquierda) y concreto con aire incluido (derecha)[41; 44; 46].

Se debe tener en mente que el cambio de la cantidad de cualquier ingrediente del concreto normalmente afecta las proporciones de los otros ingredientes, bien como, altera las propiedades de la mezcla. Por ejemplo, la adición de 2 kg de agua por metro cúbico aumentará el revenimiento en aproximadamente 10 mm, además de aumentar el volumen de aire y el contenido de pasta y disminuir el volumen de agregado y la densidad del concreto. En el ajuste de las mezclas, para un mismo revenimiento, una disminución de 1% en el contenido del aire aumentará la demanda de agua en cerca de 3 kg por metro cúbico de concreto[27].

3.4.1.1.7. CONTENIDO Y TIPO DE MATERIALES CEMENTANTES.

El contenido de materiales cementantes frecuentemente se determina a través de la relación agua – material cementante elegida y del contenido de cemento, a pesar que habitualmente se incluye un contenido de cemento mínimo en las especificaciones en conjunto con una relación agua – material cementante máxima. Los requisitos de contenido mínimo de

cemento tienen como objetivo asegurar durabilidad y acabado satisfactorios, mejorar la resistencia al desgaste de losas y garantizar una apariencia adecuada para las superficies verticales. Esto es importante aun cuando los requisitos de resistencia se cumplan con contenidos de materiales cementantes más bajos. Sin embargo, se deben evitar cantidades de materiales cementantes excesivamente elevadas, para que se mantenga la economía en la mezcla y no se afecte adversamente la trabajabilidad y otras propiedades.

En exposición severa a congelación – deshielo, descongelantes y sulfatos es deseable especificarse:

1. Un contenido mínimo de 335 kg de material cementante por metro cúbico de concreto.
2. Sólo la cantidad suficiente de agua de mezcla para que se logre la consistencia deseada sin exceder la relación agua – material cementante máxima [27].

Para la colocación del concreto bajo el agua, normalmente no se debe usar menos que 390 kg de material cementante por metro cúbico de concreto y relación agua – material cementante que no supere 0.45. Para trabajabilidad, facilidad de acabado, resistencia a abrasión y durabilidad de superficies planas, no se debe utilizar una cantidad de material cementante menos que aquella presentada en la **Tabla 11**.

Tabla 11 - Requisitos mínimos de material cementante para concreto usado en superficies planas. Las cantidades de material cementante tal vez tengan que aumentarse en la exposición severa. Por ejemplo, en el caso de exposición a descongelantes, el concreto debe contener por lo menos 335 kg/m³ de material cementante[51].

Tamaño máximo nominal del agregado, mm (pulg.)	Material cementante kg/m ³ (lb/yd ³)*
37.5 (1½)	280 (470)
25 (1)	310 (520)
19 (¾)	320 (540)
12.5 (½)	350 (590)
9.5 (¾)	360 (610)

Para economizar, la cantidad de cemento requerida se debe minimizar sin sacrificarse la calidad del concreto. Como la calidad depende principalmente de la relación agua – cemento, el contenido de agua se debe mantener mínimo, a fin de reducir los requisitos de cemento. Algunas medidas para disminuir los requisitos de agua y cemento incluyen el uso de:

1. La mezcla más áspera que se pueda utilizar.
2. El uso del mayor tamaño máximo de agregado posible.
3. La relación óptima agregado fino – agregado grueso[27].

El concreto que se expondrá a sulfatos se debe producir con el tipo de cemento presentado en la **Tabla 7**.

El agua del mar contiene cantidades significativas de sulfatos y cloruros. A pesar que los sulfatos en el agua del mar sean capaces de atacar el concreto, la presencia de cloruros inhibe la reacción expansiva que es una de las características del ataque de sulfatos. Esta es la principal explicación para que varias fuentes hayan considerado el desempeño del concreto en agua del mar con durabilidad satisfactoria, a pesar de que estos concretos se produjeron con cementos portland con contenidos de aluminato tricálcico (C_3A) tan altos como 10% o hasta mayores. Sin embargo, la permeabilidad de estos concretos era muy baja y el acero de refuerzo (armadura) tenía recubrimiento adecuado. Son aceptables los cementos portland que cumplan con los requisitos de C_3A no superior a 10%, ni inferior a 4% (para garantizar la durabilidad del refuerzo)[52]. Los materiales cementantes suplementarios tienen varios efectos sobre la demanda de agua y el contenido de aire. La adición de ceniza volante generalmente reduce la demanda de agua y el contenido de aire si no se ajusta el contenido de aditivo inclusor de aire. El microsílíce (humo de sílice) aumenta la demanda de agua y disminuye el contenido de aire. Escoria y metacaolinita tienen poco efecto cuando son usados en dosis normales.

La **Tabla 12** presenta los límites de las cantidades de material cementante suplementario en el concreto expuesto a descongelantes. Se deben consultar las prácticas locales, pues, dependiendo de la severidad de exposición, dosis menores o mayores que aquellas de la **Tabla 12** se pueden usar sin arriesgar la resistencia al descascaramiento[27].

Tabla 12 - Requisitos de materiales cementantes para concreto expuesto a descongelantes[43].

Material cementante*	Porcentaje máxima con relación a la cantidad total de material cementante (en masa)**
Ceniza volante y puzolana natural	25
Escoria	50
Humo de sílice	10
Total de ceniza volante, humo de sílice y puzolanas naturales	50†
Total de puzolanas naturales y humo de sílice	35†

* Incluye la parte del material cementante suplementario en el cemento adicionado (mezclado).

** Material cementante suplementario total incluyéndose la suma del cemento portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas.

† El humo de sílice no debe superar 10% del total de los materiales cementantes y la ceniza volante y las otras puzolanas no deben exceder 25%.

3.4.1.1.8. ADITIVOS.

Los aditivos reductores de agua se adicionan al concreto para reducir la relación agua – material cementante, la cantidad de material cementante, el contenido de agua, el contenido de paste o para mejorar la trabajabilidad del concreto sin cambiar la relación agua – material cementante. Los reductores de agua generalmente reducen los contenidos de cemento en 5% a 10% y algunos también aumentan el contenido de aire en ½% a 1%. Los retardadores (retardantes) también puedes aumentar el contenido de aire.

Los reductores de agua de alto rango reducen el contenido de agua entre 12% y 30% y algunos pueden aumentar simultáneamente el contenido de aire en 1%, mientras que otros pueden reducir o no tener ningún efecto en el contenido de aire.

Los aditivos con base de cloruro de calcio reducen el contenido de agua en cerca del 3% y aumentan el contenido de aire cerca de ½%. Al utilizarse un aditivo con base de cloruros, se debe considerar el riesgo de corrosión del refuerzo. La **Tabla 13** provee los límites recomendados del contenido de iones cloruro solubles en agua para el concreto reforzado (armado) y el concreto pretensado (presfuerzo, presforzado, precomprimido) en varias condiciones[27].

Tabla 13 - Contenidos máximos de Iones Cloruros para la protección contra la corrosión[43].

Tipo de miembro	Contenido máximo de ión cloruro (Cl ⁻) en el concreto, porcentaje por masa de cemento*
Concreto pretensado	0.06
Concreto reforzado expuesto a cloruro durante servicio	0.15
Concreto reforzado que estará seco o protegido de la humedad durante servicio	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30

*ASTM C 1218.

Cuando se utiliza más de un aditivo en el concreto, el fabricante debe asegurar la compatibilidad del entremezclado de los aditivos, o la combinación de los aditivos se debe ensayar en mezclas de pruebas. El agua contenida en los aditivos se debe considerar como parte del agua de mezcla, si el contenido de agua en el aditivo fuera suficiente para afectar la relación agua – material cementante en 0.01 o más.

El uso excesivo de aditivos múltiples se debe minimizar para un mejor control de la mezcla de concreto y para disminuir la incompatibilidad de los aditivos[27].

3.4.1.1.9. PROPORCIONAMIENTO.

El diseño de las mezclas de concreto involucra:

1. En el establecimiento de características específicas.

2. En la elección de proporciones de materiales disponibles para la producción del concreto con las propiedades requeridas y la mayor economía.

Los métodos de proporcionamiento evolucionaron desde el método volumétrico arbitrario (1: 2: 3 – cemento; arena; agregado grueso) a principios del siglo XX[40], hasta los métodos actuales de masa y volumen absoluto, descritos en el ACI comité 211[44].

Los métodos de proporcionamiento a través de masa son bastante sencillos y rápidos para estimar las proporciones de la mezcla, usando una masa supuesta o conocida de concreto por unidad de volumen. El método del volumen absoluto es más preciso y envuelve el uso de las densidades (gravedad específica) de todos los ingredientes para calcular el volumen absoluto que cada uno de ellos ocupará en una unidad de volumen de concreto, es por ello que este método será el utilizado en esta investigación. Una mezcla de concreto también se puede proporcionar por la experiencia de campo (datos estadísticos) o de mezclas de pruebas[27].

3.4.1.1.9.1. PROPORCIONAMIENTO A PARTIR DE DATOS DE CAMPO.

Un diseño de mezcla que se encuentre en uso o que fue previamente utilizado se lo puede usar en un nuevo proyecto si los datos de ensayo de resistencia y las desviaciones padrones muestren que la mezcla es aceptable. Los aspectos de durabilidad anteriormente presentados también se deben satisfacer. Los datos estadísticos deben representar los mismos materiales, proporciones y condiciones de colado para que se los pueda utilizar en el nuevo proyecto. Los datos usados para el proporcionamiento también deben proceder de un concreto con un $f'c$ dentro de 70 kg/cm^2 (7 MPa) de la resistencia requerida para el trabajo propuesto. Además, los datos deben representar, por lo menos, 30 ensayos consecutivos o dos grupos de pruebas consecutivas que totalicen, por lo menos, 30 ensayos (cada prueba o ensayo es el promedio de la resistencia de dos cilindros de la misma muestra). Si están disponibles sólo de 15 a 29 pruebas consecutivas, se puede obtener una desviación estándar corregida multiplicando la desviación estándar (S) de los 15 a 29 ensayos por el factor de corrección de la **Tabla 14**. Los datos deben representar, por lo menos, 45 días de pruebas[27].

Tabla 14 - Factor de corrección para la desviación estándar cuando están disponibles menos de 30 ensayos[43].

Número de Ensayos *	Factor de corrección para la desviación estándar **
Menos de 15	Use Tabla 15
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

**Interpole para números intermediarios de ensayos.*

***La desviación estándar modificada se debe usar para determinar la resistencia media requerida, f'_{cr} .*

La desviación estándar o modificada se usa en las siguientes expresiones:

Ecuación 1.

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34S$$

Ecuación 2.

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33S - 35, \text{ en } kg/cm^2$$

Ecuación 3.

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33S - 3.45, \text{ en MP}$$

Ecuación 4.

$$f'_{cr} = 0.9f'_c + 2.33S$$

Donde:

f'_{cr} = Resistencia a compresión media del concreto requerida como base para la elección de las proporciones de la mezcla.

f'_c = Resistencia a compresión especificada del concreto.

S = Desviación estándar.

El promedio de la resistencia a compresión de las pruebas registradas debe ser igual o mayor que la resistencia a compresión media requerida por el ACI 318, f'_{cr} , para que las proporciones del concreto sean aceptables. El f'_{cr} para proporciones de mezclas seleccionadas es igual al mayor valor obtenido por la **Ecuación 1**, **Ecuación 2** y **Ecuación 3** (para $f'_c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$ o 35 MPa). Cuando los registros de los ensayos de resistencia no cumplen con los requisitos previamente discutidos, el f'_{cr} se puede obtener de la **Tabla 15**. Un registro de resistencia de campo, varios registros de ensayo de resistencia o ensayos de mezclas de prueba se deben utilizar como documentación para mostrar que la resistencia media (promedio de resistencia) de la mezcla es igual o mayor que f'_{cr} [27].

Tabla 15 - Resistencia a compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para establecer desviación estándar[43].

Resistencia a compresión especificada, f'_c , kg/cm ²	Resistencia compresión media requerida, kg/cm ²
Menos de 210	$f'_c + 70$
210 a 350	$f'_c + 84$
Más de 350	$1.10 f'_c + 50$

Resistencia a compresión especificada, f'_c , MPa	Resistencia compresión media requerida, MPa
Menos de 21	$f'_c + 7$
21 a 35	$f'_c + 8.5$
Más de 35	$1.10 f'_c + 5.0$

Si menos de 30, pero no menos de 10 ensayos están disponibles, los ensayos se pueden usar para la documentación de la resistencia media, si el periodo de tiempo es superior a 45 días. Las proporciones de la mezcla también se pueden establecer interpolándose entre dos o más registros de pruebas, si cada uno de ellos obedece los requisitos del proyecto. Si existe una diferencia significativa entre las mezclas que se usan para la interpolación, se debe elaborar una mezcla de prueba para verificar el desarrollo de la resistencia. Si los registros de los

ensayos cumplen con los requisitos y limitaciones anteriores del ACI 318, las proporciones para la mezcla se pueden considerar aceptables para la obra.

Si el promedio de la resistencia de las mezclas con datos estadísticos es menor que f'_{cr} , o los datos estadísticos o los registros de los ensayos son insuficientes o no están disponibles, se debe proporcionar la mezcla a través del método de mezcla de prueba. La mezcla aprobada debe tener una resistencia a compresión que atienda o supere f'_{cr} . Se deben ensayar tres mezclas de prueba usándose tres relaciones agua – material cementante diferentes. Entonces se puede trazar la curva de relación agua – material cementante con relación a la resistencia y las proporciones se pueden interpolar a partir de los datos. También es buena práctica ensayarse las propiedades de la mezcla recién proporcionada a través de una mezcla de prueba[27].

El ACI 214 provee métodos de análisis estadístico para el control de la resistencia del concreto en el campo, a fin de asegurar que la mezcla atienda adecuadamente o supere la resistencia de diseño (resistencia de cálculo), f'_c [53].

3.4.1.1.9.2. PROPORCIONAMIENTO CON MEZCLAS DE PRUEBA.

Cuando no hay riesgo de ensayos de campo disponibles o son insuficientes para el proporcionamiento a través de métodos de experiencia de campo, las proporciones de la mezcla elegidas se deben basar en mezclas de pruebas[27].

Las mezclas de pruebas deben utilizar los mismos materiales de obra. Se deben elaborar tres mezclas con tres relaciones agua – material cementante distintas o tres contenidos de cemento diferentes, a fin de producir un rango de resistencias que contengan f'_{cr} . Las mezclas de prueba deben tener un revenimiento (asentamiento) de ± 20 mm y un contenido de aire dentro de $\pm 0.5\%$ respectivamente, del máximo permitido. Se deben producir y curar tres cilindros para cada relación agua – material cementante de acuerdo con ASTM C 192 o NMX-C-159[54; 55].

A los 28 días, o a una edad especificada, se debe determinar la resistencia a la compresión a través de los ensayos a compresión de los cilindros. Los resultados de las pruebas se deben

diseñar para producir una curva de resistencia versus relación agua – material cementante que se usa para proporcionar la mezcla.

Varios métodos diferentes se han utilizado para proporcionar los ingredientes del concreto, incluyéndose:

- Asignación arbitraria (1:2:3), volumétrica.
- Relación de vacíos.
- Módulo de finura.
- Área superficial de los agregados.
- Contenido de cemento.

Cualquiera de estos métodos puede producir aproximadamente la misma mezcla final después de los ajustes en el campo. Sin embargo, el mejor enfoque es la elección de las proporciones basándose en la experiencia del pasado y en datos de ensayo fiables con la relación entre resistencia y relación agua – material cementante establecida para los materiales que se utilizarán en la obra. Las mezclas de prueba pueden ser revolturas (amasadas) relativamente pequeñas, con precisión de laboratorio, o revolturas de gran volumen, producidas durante la producción normal del concreto. Normalmente, se hace necesario el uso de ambas para que se logre una mezcla satisfactoria para la obra.

En primer lugar, se deben elegir los siguientes parámetros:

1. Resistencia requerida.
2. Contenido mínimo de material cementante o relación agua – material cementante máxima.
3. Tamaño máximo nominal del agregado.
4. Contenido de aire.
5. Revenimiento deseado.

Entonces, se producen las mezclas de prueba, variándose las cantidades relativas de agregado fino y grueso, bien como los otros ingredientes. Se elige la proporción de la mezcla, basándose en consideraciones de trabajabilidad y economía.

Cuando la calidad del concreto se especifica por la relación agua – material cementante, los procedimientos de mezcla de prueba consisten esencialmente en la combinación de la pasta (agua, material cementante y aditivos químicos) de las proporciones correctas con la cantidad necesaria de agregados finos y gruesos para producir el revenimiento y la trabajabilidad requeridas. Se deben utilizar muestras representativas de los materiales cementantes, del agua, de los agregados y de los aditivos.

Entonces, se calculan las cantidades por metro cúbico. Los agregados se deben pre-humedecer y secar hasta la condición saturada con superficie seca (SSS) para simplificar los cálculos y eliminar los errores causados por las variaciones en el contenido de humedad de los agregados. Los agregados se colocan en recipientes cubiertos para que se mantengan en la condición SSS hasta que se los utilice. La humedad de los agregados se debe determinar y las masas de la mezcla de prueba se deben corregir adecuadamente[27].

El tamaño de la mezcla depende de los equipos disponibles y del número y tamaño de los especímenes de prueba que se van a utilizar. Revolturas mayores producirán datos más precisos. Se recomienda el mezclado mecánico pues representa mejor las condiciones de obra y es obligatorio en el caso de los concreto con aire incluido. Se deben utilizar los procedimientos de mezclado que se presentan en ASTM C 192 o NMX-C-159[54; 55].

3.4.1.1.9.3. MEDICIONES Y CÁLCULOS.

Se deben realizar los ensayos de revenimiento, contenido de aire y temperatura en las mezclas de prueba, además de las siguientes mediciones y cálculos:

3.4.1.1.9.3.1. Densidad (masa unitaria, peso volumétrico, peso unitario).

La densidad (masa unitaria, peso volumétrico, peso unitario) del concreto fresco se expresa en kilogramos por metro cúbico[27].

3.4.1.1.9.3.2. Rendimiento.

El rendimiento es el volumen del concreto fresco producido en una mezcla, normalmente expresado en metros cúbicos. El rendimiento se calcula dividiendo la masa total de la revoltura por la densidad del concreto fresco[27].

La densidad y el rendimiento del concreto fresco se determinan por ASTM C 138 o NMX-C-162[56; 57].

3.4.1.1.9.3.3. Volumen absoluto.

El volumen absoluto del material granular (tales como cemento y agregados) es el volumen de la materia sólida en las partículas y no incluye el volumen de los vacíos de aire entre ellas. El volumen (rendimiento) del concreto fresco es igual a la suma de los volúmenes absolutos de sus ingredientes – materiales cementantes, agua (exclusiva de la absorbida en los agregados), agregados, aditivos cuando se los utiliza y aire. El volumen absoluto se calcula a partir de la masa de los materiales y las densidades relativas (gravedad específica), como sigue:

$$Volumen\ absoluto = \frac{masa\ de\ material\ suelto}{densidad\ relativa\ del\ material\ x\ densidad\ del\ agua}$$

Se puede usar un valor de 3.15 para la densidad relativa (gravedad específica) del cemento portland. Los cementos adicionados (mezclados) tienen una densidad relativa que varía de 2.9 a 3.15. La densidad relativa de la ceniza volante varía de 1.9 a 2.8, de la escoria de 2.85 a 2.95 y del microsílíce de 2.2 a 2.25. La densidad relativa del agua es 1.0 y la densidad del agua es 1000 kg/m³ a 4°C – suficientemente preciso para los cálculos de la mezcla a la temperatura ambiente. Las densidades más precisas del agua se presentan en la **Tabla 16**. La densidad relativa del agregado normal, habitualmente varía entre 2.4 y 2.9.

La densidad relativa de los agregados que se usa en los cálculos de diseño de la mezcla puede ser la densidad relativa tanto en la condición saturada con superficie seca (SSS) como también en la condición seca en el horno. Las densidades relativas de los aditivos, tales como los reductores de agua, también se pueden considerar si es necesario[27].

Tabla 16 - Densidad del agua versus temperatura[27].

Temperatura, °C	Densidad, kg/m ³	Temperatura, °F
16	998.93	60
18	998.58	65
20	998.19	
22	997.75	70
24	997.27	75
26	996.75	
28	996.20	80
30	995.61	85

El volumen absoluto normalmente se expresa en metros cúbicos. El volumen absoluto del aire en el concreto, expresado en metros cúbicos por metros cúbicos, es igual al contenido total de aire en porcentaje dividido por 100 (por ejemplo, $7\% \div 100$) y multiplicado por el volumen del concreto de la revoltura.

El volumen del concreto en la revoltura se puede determinar por dos métodos:

1. Si las densidades relativas de los agregados y los materiales cementantes se conocen, se los pueden utilizar para calcular el volumen del concreto.
2. Si no se conocen las densidades, o si varían, se puede calcular el volumen dividiéndose la masa total de los materiales en la mezcladora por la densidad del concreto.

En algunos casos, se realizan las dos determinaciones, una para verificar la otra[27].

3.4.2. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DE PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.

3.4.2.1. DETERMINACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Llenar el matraz con el líquido especificado (keroseno libre de agua o nafta) a un nivel entre cero y un mililitro. Secar el interior del matraz arriba del nivel del líquido para evitar la

adherencia del cemento a las paredes internas. La primera lectura debe registrarse después de haberse sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio.

Debe tenerse la precaución de que la temperatura del baño sea constante durante el ensayo. De este modo se asegura que la variación de la temperatura del líquido en el matraz no tenga una variación mayor a 0.2°C al momento de tomar la lectura inicial y final.

Colocar el cemento dentro del área de ensayo para que tome la temperatura del laboratorio. Pesar 60 gr de cementante con una aproximación de 0.05 gr e introducir en pequeñas porciones dentro del matraz.

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

CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.

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

La densidad se calcula como sigue:

$$\rho_c = \frac{\text{Masa del cementante, en gr}}{\text{Volumen del líquido desplazado, en cm}^3 \text{ (ml)}} = \rho_c (\text{gr/cm}^3)$$

Donde:

ρ_c : es la densidad del cemento, en gr/cm³

El peso específico relativo del cemento se calcula con la siguiente ecuación:

$$PER_c = \frac{\rho_c}{\rho_{H_2O}}$$

Donde:

ρ_c = Densidad del cemento, en gr/cm³

ρ_{H_2O} = Densidad del agua a 4°C = 1gr/cm³

PER_c = Peso específico relativo del cemento (adimensional)[58-60].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C188-16 o NMX-C-152-ONNCCE-2015.

3.4.2.2. MUESTREO DE AGREGADOS.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

El mínimo de muestras de campo obtenidas de la producción debe ser suficiente para que los resultados de las pruebas sean confiables. El tamaño de las muestras de campo que se citan en la **Tabla 17**, es tentativo, y deben obtenerse según el tipo y número de pruebas a las cuales se van a sujetar, la muestra del material debe ser en cantidad suficiente para lograr la ejecución adecuada de las pruebas.

En algunos casos, antes de enviarse las muestras al laboratorio, éstas deben ser preparadas de acuerdo a lo convenido por las partes, sugiriéndose los casos siguientes.

Cuando la muestra de arena o grava acuse un porcentaje menor de 10% de partículas, más grandes o más pequeñas del tamaño máximo o mínimo especificado, basta reducirlas por cuarteo.

Cuando las muestras contengan más del 10% de material con tamaño superior al máximo especificado, y el volumen que se requiere no sea considerable; o bien, que no se pretenda emplear en concretos de alta resistencia, se criba y se reduce por cuarteo el material útil.

Cuando se necesite un volumen considerable, o se requiera elaborar concretos de alta resistencia y la muestra tenga más de 10% de partículas con tamaño mayor al máximo especificado, se debe hacer una trituración parcial de éstos y reducir el total por cuarteo. Cuando no exista el requisito de alta resistencia, el límite anterior puede alcanzar el 15%.

Cuando los componentes de las muestras sean fragmentos de roca mayores de 75 mm, procedentes de pepena, formación de roca no explotada o canteras, éstas deben reducirse por cuarteo.

Cuando en la zona de trabajo no exista arena en estado natural o con características físicas apropiadas, el material muestreado (grava – arena, fragmentos de roca y otros) puede molerse parcial o totalmente y reducirse por cuarteos.

El cuarteo debe hacerse cuando el volumen es considerable y solo si se requiere una muestra más pequeña que sea representativa para su estudio.

Las masas mínimas recomendables de las muestras de arena y grava que deben enviarse al laboratorio para su estudio, son las indicadas en la **Tabla 17**.

Tabla 17 – Masa mínima de la muestra[61].

Material	Tamaño máximo nominal (en mm)	Pasa por la malla (Criba No.)	Masa mínima de la muestra de campo* (en kg)
Arena	Hasta 5	4.75 mm (No. 4)	100
Grava	Hasta 75	75 mm (3")	150
Grava	Mayor de 75	----	200
Grava	Cualquiera	----	300

*En agregados ligeros (aquellos cuya masa sea inferior de 2.0) estas masas deben multiplicarse por 0.65[61; 62].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C702/C702M-11 o NMX-C-030-ONNCCE-2004.

3.4.2.3. REDUCCIÓN DE LA MUESTRAS DE AGREGADOS OBTENIDAS EN EL CAMPO AL TAMAÑO REQUERIDO PARA LAS PRUEBAS.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Cuartheador de muestras.

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

requerido para la prueba programada. La porción de muestra que se recolectó en el otro receptáculo puede ser conservada para reducción de tamaño para otras pruebas.

Cuarteo manual.

Se coloca la muestra de campo sobre una superficie plana, dura y limpia, donde no pueda haber pérdida de material ni contaminación con materias extrañas. Se mezcla el material completamente traspaleando toda la muestra en una pila cónica, depositando cada paleada sobre la anterior. Por medio de la pala se ejerce presión sobre el vértice, se aplana con cuidado la pila hasta que se obtenga un espesor y un diámetro uniformes, cuidando de que cada sector que abarque una cuarta parte de la pila resultante no se mezcle con los otros. El diámetro debe ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor. Se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales con la pala o la cuchara de albañil y se eliminan dos de las partes diagonalmente opuestas, incluyendo todo el material fino cepillando los espacios vacíos para limpiarlos. Se mezcla el material restante y se cuarteo sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas (véase **Figura 11**)[63; 64].

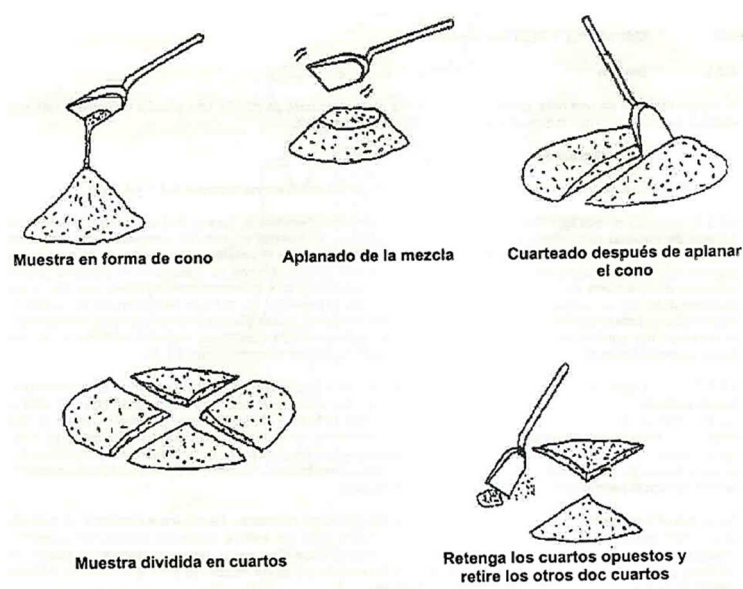


Figura 11 - Cuarteo manual[63].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM D75/D75M-14 o NMX-C-170-1997-ONNCCE.

3.4.2.4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS AGREGADOS.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

1. Se seca la muestra hasta masa constante a una temperatura de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$.
2. Se arman las cribas o mallas que van a emplearse en la determinación en orden descendente de aberturas, terminando con la charola (fondo) y se coloca la muestra en la criba superior y se tapa bien. Se agitan las cribas o mallas a mano o con un aparato mecánico por un tiempo suficiente, que se establece por experiencias o por comprobación, en la muestra que se prueba de tal forma que se satisfaga el criterio de un cribado correcto.
3. Se continúa el cribado por un periodo suficiente de tal manera que después de haberse completado, no más del 1% de la masa del residuo, en cualquier criba o malla individual, pase esa criba o malla durante un minuto de cribado continuo hecho del modo siguiente:

Se mantiene la criba individual con su charola y tapa bien ajustadas en posición ligeramente inclinada en una mano. Se golpea el lado de la criba o malla con rapidez; se le da un movimiento hacia arriba y golpeando con la palma de la otra mano a una frecuencia de 120 veces por minuto, se gira la criba o malla un sexto de vuelta cada vez que se le dan 25 golpes. Para determinar la eficiencia del cribado de tamaños mayores de la criba o malla No. 4 se limita el material sobre la criba o malla de tal forma que sólo haya una capa de partículas. Si el tamaño de las cribas montadas hace impráctico el procedimiento de cribado descrito, se emplean las cribas de 203 mm de diámetro (del marco) para verificar la eficiencia del cribado.
4. Usualmente es satisfactorio el cribado en seco para pruebas de rutina de agregados de granulometría normal. Sin embargo, cuando se desea una determinación exacta del total que pasa por la criba o malla No. 200, primero se criba la muestra por lavado. Agregar el porcentaje que sea más fino que la criba o malla No. 200 determinado por el método de lavado, al porcentaje que pasó por dicha criba o malla en el cribado en seco. Después de la operación, se criba en seco la muestra[65].

5. Se determina la masa retenida en cada criba por medio de una balanza o báscula con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra y se calculan los porcentajes hasta los décimos.
6. Se calculan los porcentajes basándose en la masa total de la muestra incluyendo el del material que pasó la criba o malla No. 200[66; 67].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C136/C136M-14 o NMX-C-077-1997-ONNCCE.

3.4.2.5. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Determinación de la densidad relativa saturada y superficialmente seca (D_r sss), por el método del picnómetro tipo sifón.

El picnómetro tipo sifón debe llenarse con agua y dejar que ésta fluya hasta que deje de gotear. Determinar la masa de la muestra o fracción preparada (M_{agss}), que no sea menor de 5 kg, para picnómetros cuyo diámetro sea de 15 cm y 8 kg para los picnómetros de 20 cm; pueden interpolarse o extrapolarse estos valores en función al tamaño de la muestra a determinar.

Tapar la salida del sifón y se va introduciendo la muestra evitando que arrastre burbujas de aire. Cuando la superficie libre de agua quede en reposo, destapar el sifón y se recibe el agua en una probeta graduada o en un recipiente previamente tarado; este volumen (V_a) se mide en la probeta o bien se determina su masa.

Determinación de la absorción.

Tomar el total de la muestra o cada una de las fracciones empleadas en la determinación de la masa específica y se seca a masa constante a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$; se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa (M_s).

Cálculos.

La densidad relativa saturada y superficialmente seca (Dr_{sss}) se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$Dr_{sss} = \frac{Mag_{sss}}{Ma}$$

Donde:

Dr_{sss} : es la densidad relativa saturada y superficialmente seca (adimensional)

Mag_{sss} : es la masa de la muestra sss en aire (kg)

Ma : es la masa del agua desalojada a razón de 1 dm³ por kg

La absorción se calcula con la siguiente expresión:

$$Aag = \frac{Mag_{sss} - Ms}{Ms} \times 100$$

Donde:

Aag : es la absorción expresada hasta décimos (%)

Mag_{sss} : es la masa de la muestra sss en aire (kg)

Ms : es la masa de la muestra seca (kg)[68; 69].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C127-15 o NMX-C-164-ONNCCE-2014.

3.4.2.6. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD RELATIVA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Determinación de densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca (Dr_{sss}).

- Determinar la masa del picnómetro lleno con agua hasta su nivel de aforo.

- Determinar la masa (M_m) de un volumen de muestra, preparada en condición de saturada y superficialmente seca (sss), cuyo volumen sea entre 33% a 50% del volumen del picnómetro que se va a emplear. Esta se introduce en el picnómetro y se agrega agua hasta que cubra la muestra en exceso. El picnómetro bien tapado, se gira, agita e invierte para eliminar todas las burbujas de aire. Si es necesario se ajusta la temperatura sumergiéndolo en agua circulante hasta alcanzar la temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; después se llena con agua hasta el nivel de aforo, se seca superficialmente, se determina su masa con una aproximación de 0.1% de la masa de la muestra empleada.

Determinación de la absorción.

Tomar otra muestra con una masa no menor de 200 gr, determinar la masa de la muestra saturada y superficialmente seca, se seca a masa constante a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$, dejar enfriar a temperatura ambiente y determinar la masa de la muestra seca.

Cálculos.

La densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Dr_{sss} = \frac{M_{sss}}{M_{pa} + M_{sss} - M_{pma}}$$

Donde:

Dr_{sss} : es la densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca (adimensional)

M_{pa} : es la masa del picnómetro lleno de agua (gr)

M_{sss} : es la masa de la muestra saturada y superficialmente seca (gr)

M_{pma} : es la masa del picnómetro, muestra y agua hasta el nivel de aforo (gr)

La absorción, se calcula con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s} \times 100$$

Donde:

A: es la absorción (%)

M_{sss}: es la masa de la muestra saturada y superficialmente seca (gr)

M_s: es la masa de la muestra seca (gr)

La densidad relativa aparente seca, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Dr_s = \frac{Dr_{sss}}{1 + \frac{A}{100}}$$

Donde:

Dr_s: es la densidad relativa aparente seca (adimensional)

Dr_{sss}: es la densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca (adimensional)

A: es la absorción (%) [70; 71].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C128-15 o NMX-C-165-ONNCCE-2014.

3.4.2.7. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA DE AGREGADOS.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Procedimiento de compactación con varilla.

El recipiente se llena hasta la tercera parte de su volumen y la superficie se nivela con los dedos. El material se compacta con la varilla dándole 25 penetraciones, distribuidas uniformemente sobre la superficie, con una fuerza tal que no triture las partículas del agregado. A continuación, se agrega material hasta las dos terceras partes de su volumen y nuevamente se compacta con 25 penetraciones, de acuerdo como se describió anteriormente. El recipiente se llena totalmente hasta que el material sobrepase el borde superior, y se vuelve a compactar con 25 penetraciones. El enrase, cuando se trata de agregado fino, se hace con el enrasador, mediante una operación de corte horizontal.

Cuando se trata del agregado grueso, se hace visualmente, quitando y poniendo partículas, de tal manera que los salientes sobre la superficie del borde compensen las depresiones por debajo de él. Se determina la masa total del recipiente con el material. Se calcula la masa neta del material contenida en el recipiente.

Determinación de la masa volumétrica suelta.

El recipiente se llena hasta que el material sobrepase el borde sin derramarse, por medio de una pala o cucharón, dejando caer el agregado de una altura no mayor de 50 mm sobre el borde del recipiente, distribuyéndolo uniformemente, para evitar la segregación.

El enrase se hace de la misma forma que se indicó en la determinación de la masa volumétrica compacta. Se calcula la masa neta del agregado en kg, contenida en el recipiente. La masa volumétrica obtenida en kg/m³ determinada por estos métodos de prueba, es para agregados secos[49; 50]. Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C29/29M-17a o NMX-C-073-ONNCCE-2004.

3.4.2.8. CONTENIDO DE AGUA EN AGREGADOS POR SECADO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

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

Se dejará enfriar la muestra hasta la temperatura ambiente y se determinará su masa con una aproximación de del 0.1%.

Cálculo.

El contenido de agua, en por ciento, se calcula con la fórmula siguiente:

$$H = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Donde:

H: es el contenido de agua en %

Mh: es la masa de la muestra húmeda

Ms: es la muestra seca

El contenido de agua superficial es igual a la diferencia entre el contenido de agua total y la absorción[68; 70; 72; 73].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C566-13 o NMX-C-166-ONNCCE-2006.

3.4.3. MEZCLADO DEL CONCRETO.

El mezclado del concreto debe resultar en un producto uniforme y homogéneo que requiere de una rutina de mezclado adecuada basada en el modo y secuencia de introducir los ingredientes a la mezcladora y el tiempo de mezclado.

Generalmente, en primer lugar, se introduce parte del agua de mezclado con el diez por ciento de la grava, en segundo lugar, se agrega gradualmente la arena con la grava restante, en tercer lugar, el cemento con el resto del agua. Los aditivos sólidos se introducen con la arena o el cemento, mientras que los líquidos con el agua.

Siguiendo este procedimiento se evita la formación de grumos de pasta de cemento y la adherencia de pasta en las paredes de la revolvedora. El tiempo necesario para la introducción de los ingredientes se conoce como tiempo de carga, representa la cuarta parte del tiempo de mezclado.

El tiempo efectivo de mezclado inicia cuando todos los ingredientes están dentro de la mezcladora.

3.4.3.1. TIEMPO DE MEZCLADO.

En el mezclado se trata de obtener el mínimo de tiempo que produzca un concreto homogéneo y uniforme dentro y entre revolturas. El número mínimo de revoluciones para lograrlo es el

tiempo de mezclado, generalmente entre 55 y 100 rpm. La **Figura 12** muestra la relación entre la resistencia y el tiempo de mezclado.

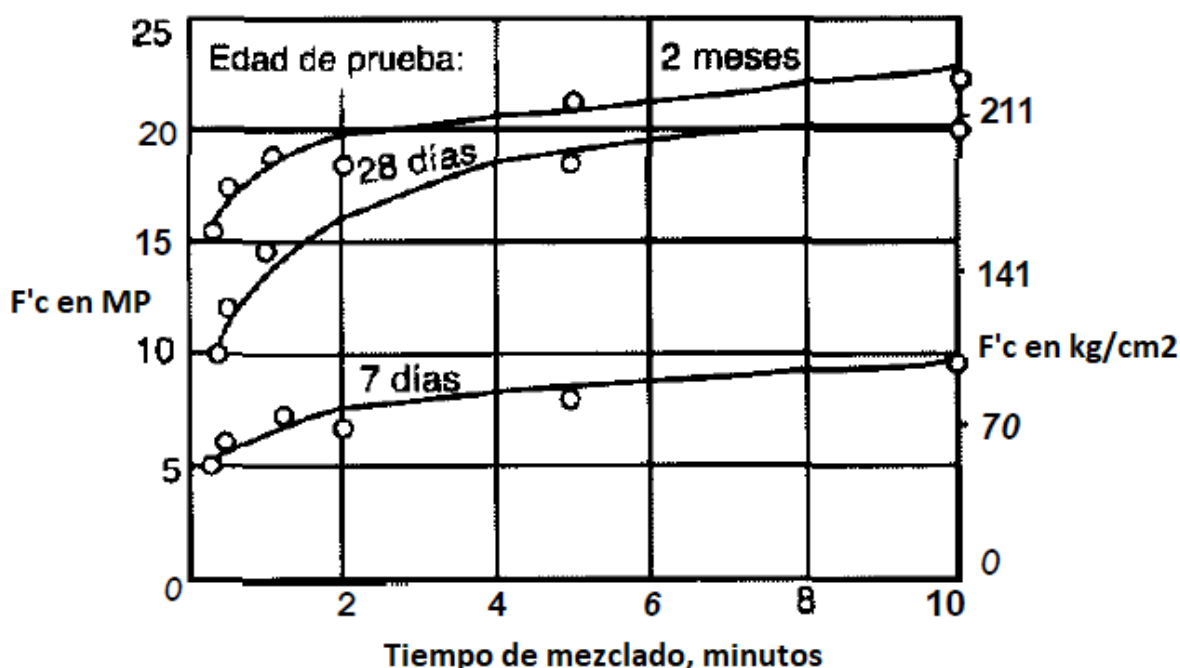


Figura 12 - Efecto del tiempo en la resistencia del concreto y su variación[74].

La uniformidad de la mezcla se expresa por medio de la resistencia a la compresión, de acuerdo con la **Figura 12**, se necesita un tiempo de mezclado mínimo de dos minutos. El tiempo de mezclado depende del tipo de mezcladora y de su tamaño, en mezcladoras mayores de 4 metros cúbicos el tiempo de mezclado puede ser mayor de tres minutos.

Para concreto ligero el tiempo es mayor de cinco minutos pues debe permitir la saturación del agregado ligero antes de agregar el cemento Portland. Cuando el tiempo de mezclado es mayor al especificado se puede presentar evaporación del agua, trituración del agregado, pérdida de trabajabilidad y, posiblemente, aumento de resistencia. Cuando el concreto tiene un aditivo inclusor de aire el contenido de aire disminuye conforme aumenta el tiempo de mezclado.

Un tiempo de mezclado mayor al necesario no afecta la resistencia y durabilidad, pero la trabajabilidad disminuye en forma significativa.

En concreto mezclado a mano es difícil obtener uniformidad entre revolturas, y si se requiere de mayor cuidado y esfuerzo adicional durante el mezclado, se debe evitar que el agua escape de los ingredientes durante el mezclado[74].

3.4.3.2. ESPECIFICACIONES DEL AGUA PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETO.

Las aguas que se pretendan usar para la elaboración y curado del concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir los requisitos que aparecen en la **Tabla 18**.

Tabla 18 – Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas[75].

SALES E IMPUREZAS	CEMENTOS RICOS EN CALCIO LÍMITES EN P.P.M.	CEMENTOS SULFORESISTENTES LÍMITES EN P.P.M.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
Cloruros como CL		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de puente	400	600
Para otros concretos reforzados en ambientes húmedo o en contacto con metales como aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700	1000
Sulfato como SO ₄	3000	3500
Magnesio como Mg ⁺⁺	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Álcalis totales como NA ⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o aceites	0	0

SALES E IMPUREZAS	CEMENTOS RICOS EN CALCIO LÍMITES EN P.P.M.	CEMENTOS SULFORESISTENTES LÍMITES EN P.P.M.
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150	150
Valor de pH	No menor de 6	No menor de 6.5

Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.

El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.

Cuando se use cloruro de calcio (CaCl_2) como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la **Tabla 18**.

El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la fabricación y curado de concretos sin acero de refuerzo.

El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la **Tabla 18**, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características semejantes elaborados con esta agua han acusado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Cuando se sospeche que con la integración de los componentes de los ingredientes del concreto (cemento, agregados, aditivos) el agua puede producir resultados adversos, se deben hacer los estudios y pruebas que se estime necesarios con la debida anticipación.

La toma de muestras para verificar si el agua en cuestión, cumple con los requisitos de calidad necesarios, se hace de acuerdo con la norma NMX-C-277.

La determinación de las impurezas de las aguas se debe de hacer de acuerdo con los métodos que se describen en la NMX-C-283, o por cualquier otro método de prueba con el que se obtengan resultados con el mismo grado de confiabilidad[75].

3.4.4. ENSAYOS AL CONCRETO FRESCO.

3.4.4.1. DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Humedecer el molde; colocarlo sobre una superficie horizontal, plana, rígida, húmeda y no absorbente. El operador lo debe mantener firme en su lugar durante la acción de llenado, apoyar los pies en los estribos que tiene para ello el molde. A continuación, llenar el molde con 3 capas aproximadamente de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura aproximada de 7 cm, la segunda capa debe llegar a una altura de aproximadamente 15 cm y la tercera, al extremo del borde.

Compactar cada capa con 25 penetraciones de la varilla introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente sobre la sección de cada capa, por lo que es necesario inclinar la varilla ligeramente en la zona perimetral; aproximadamente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después, con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro. Compactar la segunda capa y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa colocar un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde, antes de empezar la compactación.

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

Después de terminar la compactación de la última capa, enrasar el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Limpiar la superficie exterior de la base de asiento, e inmediatamente levantar el molde con cuidado en dirección vertical.

La operación para levantar completamente el molde los 30 cm de su altura, debe hacerse en 5 segundos $\pm$ 2 segundos, alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación completa desde el comienzo de llenado hasta que se levante el molde, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min.

Cálculo y expresión de los resultados.

Medir inmediatamente el revenimiento, determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia de alturas en el centro desplazado de la superficie superior del espécimen. Si alguna porción del concreto se desliza o cae hacia un lado, se desecha el ensayo y se efectúa otra con una nueva porción de la misma muestra.

Si dos ensayos consecutivos hechos de la misma muestra presentan fallas al caer parte del concreto a un lado, probablemente el concreto carece de la necesaria plasticidad y cohesividad; en este caso no es aplicable el ensayo de revenimiento. Para valores y tolerancias véase la **Tabla 19**.

Para confirmar esta situación, se requiere obtener una nueva muestra de la misma entrega.

Tabla 19 - Valor nominal del revenimiento y tolerancias[76].

Revenimiento normal (mm)	Tolerancia (mm)
Menor de 50	± 15
De 50 a 100	± 25
Mayor de 100	± 35

El revenimiento debe medirse mínimamente con una aproximación de 1 cm[76; 77].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C143/C143M-15a o NMX-C-156-ONNCCE-2010.

3.4.4.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Colocación del dispositivo de temperatura.

Sumerja la porción sensible del dispositivo de medición de temperatura en el concreto fresco un mínimo de 75 mm. Presiones suavemente la superficie del concreto con la mano alrededor del dispositivo de medición de temperatura para que la temperatura ambiente no afecte la lectura.

Lectura de la temperatura.

Deje el dispositivo de medición de temperatura en el concreto fresco por un mínimo de 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice, lo cual normalmente sucede cuando no varía en más de 0.5°C en 1 minuto. Luego lea y registre la temperatura.

La medición de la temperatura del concreto fresco se debe llevar a cabo dentro de los 5 minutos después de obtenida la muestra excepto cuando el concreto contenga agregado de tamaño máximo nominal mayor de 75 mm ya que puede requerir arriba de 20 minutos para que se estabilice la lectura[78; 79].

Parámetros recomendados de temperatura del concreto fresco.

En general, se consideran condiciones extremas de temperatura para el concreto cuando la temperatura ambiental es inferior a 5°C y superior a los 28°C, en cuyo caso se debe tener especial cuidado en la selección de materiales, dosificación, preparación, transporte, curado, control de calidad, encofrado y desencofrado del concreto. También podemos considerar como condición extrema la combinación de condiciones especiales de temperaturas ambientes, humedades relativas y velocidad del viento[80].

Según el ACI 305, el límite máximo permisible del concreto fresco en clima cálido es de 35°C, a menos que se especifique lo contrario o, si no se acepta una temperatura más alta permitida por el arquitecto/ingeniero[81].

Durante climas fríos, la temperatura de la mezcla del concreto deberá controlarse para que cuando el concreto se vacíe, su temperatura no baje de los valores mostrados según el ACI 306 en la **Tabla 20** para concreto de peso normal.

La temperatura del concreto al momento del vaciado deberá estar siempre cerca del mínimo de las temperaturas proporcionadas en la **Tabla 20**. Las temperaturas de vaciado no deberán ser superiores a 11°C que estos valores mínimos[80; 82].

Tabla 20 - Temperaturas de concreto recomendadas durante climas fríos según ACI 306[80; 82].

Temperaturas de Concreto Recomendadas			
Línea	Temperatura del Aire	Tamaño de la Sección, dimensión mínima, mm.	
		< 300 mm (<12)	300 a 900 mm (12-36)
Temperatura mínima del concreto vaciado y mantenido			
1	-	13 °C (55 °F)	10 °C (50 °F)
Temperatura mínima del concreto mezclado para la temperatura del aire indicada*			
2	< -1 °C (30 °F)	16 °C (60 °F)	13 °C (55 °F)
3	-18 a -1 °C (0-30 °F)	18 °C (65 °F)	16 °C (60 °F)
4	> -18 °C (<0 °F)	21 °C (70 °F)	18 °C (65 °F)
Pérdida gradual máxima de temperatura permisible, 24 horas después del final de la protección			
5	-	10 °C (50 °F)	5 °C (40 °F)

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C1064/C1064M-17 o NMX-C-435-ONNCCE-2004.

3.4.5. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.

3.4.5.1. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REBOTE MEDIANTE ESCLERÓMETRO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Se coloca el esclerómetro en forma perpendicular sobre la superficie del concreto que se va a evaluar y se ejerce una presión para permitir que el embolo se libere y se deja que se extienda hasta alcanzar su máxima extensión, eliminando la presión sobre el martillo, manteniendo la perpendicularidad y la presión uniforme hasta que la masa interna del martillo golpee la superficie del concreto. Después del impacto se oprime el botón pulsador y se toma la lectura en la escala graduada, registrándola, esta operación se debe repetir diez veces como mínimo y con una separación entre impactos de 25 mm a 50 mm.

Se determina el promedio de lecturas. Si más de tres lecturas difieren del promedio en seis o más unidades, se desecha la prueba. Se eliminan las lecturas que difieran del promedio en más de 5 unidades. Se determina el promedio de las lecturas restantes, siendo este el número de rebote[32; 83].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C805/C805M-13a o NMX-C-192-ONNCCE-2006.

3.4.5.2. DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL TRANSVERSAL.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Determinación de la frecuencia transversal.

Se coloca el espécimen sobre el soporte, de tal manera, que pueda vibrar sin restricciones importantes en los dos sentidos transversales. El espécimen debe de estar en tal posición, que la fuerza impulsora sea normal a la superficie y aplicada en un punto distante de los puntos nodales, generalmente a una distancia media entre los extremos o cerca de uno de los extremos del espécimen. Se coloca la unidad captadora contra la superficie del concreto de tal manera, que actúe en la dirección de la vibración.

El espécimen de prueba debe hacerse vibrar a frecuencias variables, observando al mismo tiempo la indicación de la salida amplificada del captador. Se registra la frecuencia de la vibración del espécimen de prueba que resulte de la indicación máxima que tenga un pico bien definido sobre el indicador y cuya observación de los puntos nodales indiquen una vibración transversal fundamental, es decir una frecuencia transversal fundamental. Para la vibración transversal fundamental los puntos nodales están localizados a 0.244 de la longitud del espécimen a partir de cada extremo (aproximadamente puntos localizados en la cuarta parte).

Las vibraciones son máximas en los extremos, aproximadamente tres quintas partes del máximo en el centro y cero en los puntos nodales; entonces el movimiento del detector a todo lo largo del espécimen provee de información al operador si las vibraciones observadas en el indicador provienen de la vibración del espécimen en su modo transversal fundamental. Se

ajustan los amplificadores en los circuitos impulsor y captado para proporcionar una indicación satisfactoria. Para evitar distorsión se mantiene la fuerza impulsora tan baja como sea posible para una buena respuesta en resonancia.

Cálculo del módulo dinámico de Young a partir de la frecuencia fundamental transversal.

El cálculo del módulo dinámico de Young de elasticidad, E , en kg/cm^2 , a partir de la frecuencia fundamental transversal, del peso, y de las dimensiones del espécimen de prueba se realiza por medio de la siguiente fórmula:

$$E = CWn^2$$

En donde:

C es $0.00096 (L^3 T/b t^3)$, $s^2\text{cm}^2$ para un prisma.

C es $0.00164 (L^3 T/b t^4)$, s^2/cm^2 para un cilindro.

W es el peso del espécimen, kilogramos.

n es la frecuencia fundamental transversal, Hz.

En las expresiones de los valores de C , se tiene:

L es la longitud del espécimen, centímetros.

d es el diámetro del cilindro, centímetros.

t , b son las dimensiones de la sección transversal del prisma en centímetros estando t en la dirección en la cual se impulsa.

T es el factor de corrección que depende de la relación del radio de giro, k (que para un cilindro es $d/4$ y para un prisma es $t/3.3364$), a la longitud del espécimen, L , y depende también de la relación de Poisson[33; 84].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C215-14 o NMX-C-089-1997-ONNCCE.

3.4.5.3. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Clasificación.

La resistividad eléctrica puede obtenerse a través de distintos medios dependiendo de la forma del elemento o estructura. La resistividad eléctrica se puede medir en laboratorio sobre muestras de concreto o directamente en sitio sobre la estructura, y se puede clasificar de acuerdo con la **Tabla 21**.

Tabla 21 - Tipos de elemento y resistividad eléctrica[34].

Tipo de elemento	Tipo de resistividad eléctrica
Pruebas en laboratorio en cilindros colados en sitio o núcleos (corazones) de concreto	Real
Elementos de estructuras de concreto hidráulico	Aparente

Ensayo en el laboratorio para obtener la resistividad real.

Después de la preparación del espécimen, se procede al montaje en forma vertical sobre una superficie no conductora de electricidad, plana y horizontal.

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

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

La resistencia eléctrica (Re) se dará por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{E}{I}$$

Donde:

Re = Resistencia eléctrica, ohm, con aproximación de una décima.

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

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

Para obtener el valor de la resistividad eléctrica (ρ) se debe multiplicar la resistencia eléctrica por un factor de constante de celda (k), la cual es la relación entre el área de sección transversal (A) del espécimen y la longitud (L) del mismo como se indica a continuación:

$$k = \left[\frac{A}{L} \right] \quad \rho = Re \cdot k$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica, en ohm-cm u ohm-m, con aproximación de una décima.

Re = Resistencia eléctrica, en ohm, con aproximación de una décima.

k = Constante de celda en cm o m.

A = Área de la sección transversal del espécimen, en cm² o m², con aproximación a dos décimas.

L = Longitud del espécimen, en cm o m, con aproximación a dos décimas[34; 85].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C1760-12 o NMX-C-514-ONNCCE-2016.

3.4.5.4. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PULSO A TRAVÉS DEL CONCRETO (MÉTODO DE ULTRASONIDO).

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Calibración con barras testigo.

Para verificar la precisión de las mediciones de tiempo de transmisión, se emplean barras testigo como dispositivo de calibración. La diferencia entre las lecturas tomadas con este

dispositivo y la constante del mismo, deben ajustarse. La calibración debe verificarse en los intervalos de tiempos de tránsito esperados.

Calibración a “cero”.

Se mide directamente haciendo presión a los dos transductores juntos con un agente de acoplamiento, se aplica la misma presión que en la medición de la estructura, al medir el tiempo de tránsito. Las unidades de respuesta digital son recomendables para ajustes de cero, acoplando los dos transductores entre sí. Es conveniente después de ajustar el cero, verificar el tiempo de tránsito en la barra de testigo.

Determinación del tiempo de tránsito.

Para medir el tiempo de tránsito, es necesario que se coloque un agente apropiado de acoplamiento (aceite, grasa, jalea de petróleo u otro material viscoso) para los diafragmas del transductor en la superficie de prueba o en ambos, para evitar aire atrapado entre la superficie de contacto de los diafragmas y el concreto asegurando un buen contacto.

Cálculo.

La velocidad de pulso se calcula con la siguiente expresión:

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

Donde:

V es la velocidad de pulso en m/s.

D es la distancia entre transductores en m.

T es el tiempo de tránsito en s (tiempo medido menos el tiempo de corrección cero a corregido por errores de calibración)[35; 86].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C597-16 o NMX-C-275-ONNCCE-2004.

3.4.5.5. MIGRACIÓN DE CLORUROS.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Este ensayo consiste en someter una probeta de concreto cilíndrica a un potencial eléctrico aplicado axialmente a través de ella, forzando a que los iones de cloruro, presentes en las soluciones externas, migren hacia el interior del espécimen.

Una vez transcurrido el tiempo de ensayo de la muestra, la probeta se parte axialmente, y la sección de fractura se rocía con una solución de nitrato de plata. La penetración de cloruros en la muestra se puede medir a partir del blanco precipitado que resulta de la reacción del nitrato de plata con los iones de cloruro que penetraron en el concreto.

Una vez medida la distancia de penetración, se puede calcular el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario[36; 87].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa NT BUILD 492.

3.4.6. ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.

3.4.6.1. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Colocación de especímenes en la máquina de ensayo.

Limpiar las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de ensayo, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior hace un contacto suave y uniforme. Los cubos se colocan en la prensa sobre las caras que estuvieron en contacto con las paredes del molde. Se debe aplicar la carga con una velocidad continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. Las probetas deberán ser cabeceadas antes de su ensaye.

Cálculo.

Calcular la resistencia a la compresión del espécimen, dividiendo la carga máxima soportada durante el ensayo entre el área promedio de la sección transversal como indica la siguiente expresión:

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

Donde:

f_c es la resistencia a compresión.

F es la carga máxima

A es el área del espécimen[88; 89].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C39/C39M-17b o NMX-C-083-ONNCCE-2014.

3.4.6.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO USANDO UNA VIGA SIMPLE CON CARGA EN LOS TERCIOS DEL CLARO.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Se voltea el espécimen sobre un lado con respecto a la posición del moldeado, se centra en los bloques de apoyo y éstos a su vez deben estar centrados respecto a la fuerza aplicada; los bloques de aplicación de carga se ponen en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios entre los apoyos. Cuando se usan especímenes cortados la posición del espécimen debe ser tal que la cara en tensión corresponda a la superficie superior o inferior del elemento del cual se obtuvo. Se debe tener contacto total, entre la aplicación de la carga y los bloques de apoyo con la superficie del espécimen. Se deben lijar las superficies o bien usarse tiras de cuero, si la separación de la línea de contacto entre ellas y los bloques es mayor de 0.1 mm. La carga se debe aplicar a una velocidad uniforme.

Cálculo.

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula como sigue:

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

En donde:

R = Módulo de ruptura, en MPa (kgf/cm²).

P = Carga máxima aplicada, en N (kgf).

L = Distancia entre apoyos, en cm.

b = Ancho promedio del espécimen, en cm.

d = Peralte promedio del espécimen, en cm[90; 91].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM – C78/C78M-16 o NMX-C-191-ONNCCE-2015.

3.4.6.3.DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Para especímenes estándar de 150 mm x 300 mm, colocarlos con el deformímetro sobre el bloque de la prensa, y centrarlos antes de la aplicación de la carga.

Colocar la carátula de los indicadores en ceros o en su caso registrar la lectura inicial para realizar la corrección posterior.

Aplicar una precarga para estabilizar la lectura de los micrómetros, entre el 10% y 15% del esfuerzo máximo obtenido del promedio de los dos especímenes ensayos a compresión.

Durante la primera precarga, verificar el funcionamiento de los extensómetros y descargar gradualmente.

Aplicar una segunda precarga hasta la misma carga que la anterior, registrando cargas y deformaciones cada tonelada hasta 5 t, después a cada 5 t. Al retirar la carga observar si los deformímetros regresaron a la lectura inicial y si la deformación leída en ellos es similar; si no es así, verificar el centrado y ajustar los indicadores. Realizar otras precargas hasta lograrlo.

Aplicar la carga de ensayo registrando deformaciones a cada tonelada hasta una carga de 5 t.

Si la carátula de la prensa lo permite en las primeras 2 t, registrar las deformaciones a cada 0.5 t, de no ser así, las lecturas deben ser registradas cada tonelada hasta llegar a 5 t.

De 5 t en adelante, las deformaciones deben ser registradas cada 5 t, hasta llegar al 60% del esfuerzo máximo. La velocidad de la carga debe ser tal que las primeras 5 t se deben aplicar en 1 min aproximadamente, de ahí en adelante 5 t a cada 20 segundos, aproximadamente.

Para determinar la relación de Poisson, registrar la deformación transversal en los mismos puntos en que fue registrada la deformación longitudinal.

En el caso de corazones o cilindros de tamaño diferente al estándar, el procedimiento a seguir es similar al descrito en los párrafos anteriores, excepto que las cargas aplicadas deben ser proporcionales al área transversal del espécimen.

Cálculo.

Determinar los esfuerzos obtenidos en cada lectura de aplicación de carga de acuerdo con el área del espécimen.

$$\text{Esfuerzo} = \text{carga} / \text{área}$$

Determinar las deformaciones con respecto a la longitud de medición.

Deformación unitaria = promedio de lecturas de los dos extensómetros/longitud de medición o, Deformación unitaria = (promedio de la lectura de los extensómetros x factor de multiplicación) /longitud de medición.

En ambos casos la longitud de medición es la distancia de centro a centro de los tornillos de los anillos.

En el caso de deformímetros adheribles se toma la deformación unitaria del lector.

Determinar mediante interpolación lineal, el esfuerzo (S1) correspondiente a una deformación unitaria de 50 millonésimas (e1), así como la deformación unitaria (e2) correspondientes al 40% del esfuerzo máximo (S2).

$$\text{Fórmula de interpolación: } S - S1 = (S2 - S1 / e2 - e1) (e - e1)$$

Donde:

S es igual al esfuerzo requerido.

S1 es el esfuerzo menor.

S2 es el esfuerzo mayor.

e es la deformación requerida.

e1 es la deformación menor.

e2 es la deformación mayor.

Si se requiere, se grafica la curva esfuerzo – deformación en un diagrama de coordenadas con las deformaciones unitarias y los esfuerzos calculados.

Consideran el esfuerzo = “S” y la deformación = “e”.

Determinar el esfuerzo “S1”, en MPa (kgf/cm²) correspondiente a la deformación unitaria (e1) igual a 0.000050.

Con el esfuerzo “S2” correspondiente al 40% del esfuerzo máximo ya calculado, determinar la deformación unitaria “e2”.

Calcular el módulo de elasticidad empleando la fórmula siguiente:

$$E = \frac{S2 - S1}{e2 - 0.000050}$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad estático, en Mpa (kgf/cm²).

S1 es el esfuerzo a 50 millonésimas de deformación.

S2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de fc máxima.

e2 es la deformación al 40% de fc máxima.

Para calcular la relación de Poisson se procede con la fórmula siguiente:

$$M = \frac{et2 - et1}{e2 - 0.000050}$$

En donde:

M es la relación de Poisson.

et2 es la deformación transversal unitaria a la altura media del espécimen, producida por el esfuerzo S2.

et1 es la deformación transversal unitaria a la altura media del espécimen, producida por el esfuerzo S1.

Reportar como módulo de elasticidad estático el promedio de los resultados obtenido en los dos cilindros ensayados a módulo[92; 93]. Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C469/C469M-14 o NMX-C-128-ONNCCE-2013.

3.4.6.4. DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA, ABSORCIÓN Y VACÍOS.

RESUMEN DE LA PRUEBA.

Obtención de la masa seca.

Determinar la masa de las probetas y secar en un horno a una temperatura de 100°C a 110°C por no menos de 24 horas. Después de sacar cada probeta del horno dejarla enfriar en aire seco de preferencia en un desecador a una temperatura de 20°C a 25°C y determinar su masa.

Introducir nuevamente al horno por 24 horas una vez enfriada se determina nuevamente su masa. Si la diferencia entre estos dos valores obtenidos sucesivamente excede en 0.5% de la masa menor se regresan las probetas al horno por un periodo adicional de secado por 24 horas y repetir este procedimiento hasta que la diferencia entre 2 determinaciones sea menor de 0.5% de la masa menor obtenida, esta última se designa con la letra “A”.

Obtención de la masa saturada por inmersión.

Después de obtener la masa seca, sumergir las probetas en agua a una temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por un tiempo no menor a 48 horas. Se seca superficialmente la probeta quitando la humedad superficial con una tela absorbente y determinar su masa. Hasta que dos determinaciones sucesivas de la masa del espécimen con intervalos de 24 horas de saturación muestren un aumento de masa menor 0.5% respecto al de la masa mayor, esta masa final se designa como “B”.

Obtención de la masa saturada por ebullición.

Colocar la probeta que se ha procesado en un recipiente adecuado, agregue agua hasta cubrir totalmente la probeta y posteriormente mantener en ebullición durante 5 horas cuidando que el espécimen se mantenga sumergido en su totalidad todo este tiempo. Deje enfriar en forma natural hasta una temperatura final de 20°C a 25°C .

Retirar la probeta del recipiente, quitar la humedad superficial con una tela absorbente y determinar la masa de la probeta, designando a esta masa por ebullición y superficialmente seca con la letra “C”.

Determinación de la masa de la probeta sumergida.

En un recipiente lleno de agua colocar la canasta metálica a una temperatura de 20°C a 25°C sobre la balanza en equilibrio. Poner la probeta después del paso descrito anterior, en la canasta de malla y determinar la masa sumergida que se designa con la letra “D”.

Cálculo.

Empleando las masas determinadas en los apartados anteriores, hacer los cálculos siguientes:

Porcentaje de absorción después de la inmersión:

$$\frac{B - A}{A} \times 100$$

Porcentaje de absorción después de la ebullición:

$$\frac{C - A}{A} \times 100$$

Masa específica seca:

$$g1 = \frac{A}{C - D}$$

Masa específica, después de la inmersión:

$$\frac{B}{C - D}$$

Masa específica, después de la ebullición:

$$\frac{C}{C - D}$$

Masa específica aparente:

$$g2 = \frac{A}{A - D}$$

Porcentaje de volumen de poros permeables (vacíos):

$$\frac{g2 - g1}{g2} \times 100, \text{ o bien } \frac{C - A}{C - D} \times 100$$

Donde:

A es la masa seca, en gr.

B es la masa saturada por inmersión y superficialmente seca, en gr.

C es la masa saturada por ebullición y superficialmente seca, en gr.

D es la masa de la probeta sumergida, en gr.

g_1 es la masa específica seca, en gr.

g_2 es la masa específica aparente, en gr[94; 95].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C642-13 o NMX-C-263-ONNCCE-2010.

3.4.7. OTROS PROCEDIMIENTOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LOS ENSAYOS DEL CONCRETO.

3.4.7.1. MUESTREO DEL CONCRETO FRESCO.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.

La muestra se obtiene interceptando con el recipiente el flujo completo de descarga de la mezcladora o desviando el flujo sin segregar el concreto, aproximadamente a la mitad de la descarga. Cuando el muestreo se realiza en planta, se deben esperar 7 minutos a la velocidad de mezclado especificada para la unidad revolvedora, antes de tomar la muestra. Realizar el despunte estimado de 10 litros mínimo y se procede a tomar la muestra interceptando con el recipiente totalmente el flujo de la descarga del canalón.

Para verificar el revenimiento en obra, con la finalidad de aceptar o rechazar el concreto se debe tomar una muestra al inicio de la descarga, después de despuntar y verificar que el concreto esté homogéneo. Realizar el despunte de 10 litros, proceder a tomar la muestra interceptando con el recipiente totalmente el flujo de la descarga del canalón.

Después de que el concreto haya sido aceptado, la muestra para los demás ensayos tomar entre el 15% y 85% de la descarga, interceptando con el recipiente el flujo completo de descarga o desviando el flujo sin segregar el concreto. La velocidad de descarga debe controlarse con el número de revoluciones de la olla y no por la mayor o la menor abertura de la compuerta[96; 97].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C172/C172M-17 o NMX-C-161-ONNCCE-2013.

3.4.7.2. ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.

Elaborar los especímenes en el lugar en donde se almacenarán durante las primeras 24 horas. Se debe transportar la muestra de concreto a dicho lugar inmediatamente después de su toma, para proceder a la elaboración de los especímenes. Se colocan en una superficie rígida, plana y horizontal, que no está sujeta a vibraciones u otras perturbaciones. Se deben evitar los movimientos bruscos, los golpes y rayado en la superficie de los especímenes.

Colocar el concreto en los moldes usando un cucharón. Para evitar la segregación es necesario el remezclado del concreto en el recipiente de muestreo antes de la elaboración de los especímenes. Se toma el concreto del recipiente de muestreo de tal forma que sea representativo de la revoltura. Se mueve el cucharón alrededor del borde superior del molde al descargar el concreto, para asegurar una distribución uniforme y reducir la segregación del agregado grueso. Distribuir el concreto colocado, empleando la varilla de compactación, antes de iniciar ésta. Al colocar la última capa el operador debe procurar que la cantidad de concreto llene el molde rebosándolo después de su compactación. Elaborar los especímenes llenando y compactando en capas.

Compactación por varillado.

Se coloca el concreto dentro del molde, en el número de capas especificado, de aproximadamente igual espesor. Se varilla cada capa con el extremo redondeado empleando el número de penetraciones y tamaño de varilla especificado. Se compacta la capa inferior en todo su espesor. Para cada capa subsecuente se distribuyen las penetraciones uniformemente en toda la sección transversal del molde permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 20 mm dentro de la capa inmediata inferior. Después de compactar cada capa se debe golpear ligeramente con el mazo de hule las paredes del molde para eliminar hasta donde sea posible las oquedades que deja la varilla. Después de la compactación, se enrasa la superficie del concreto.

Curado.

Para evitar la evaporación del agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se deben cubrir inmediatamente después de terminados, de preferencia, con una placa no absorbente y no reactiva, o con una membrana de plástico durable e impermeable[55; 98; 99].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C192/C192M-16a y ASTM C31/C31M-18 o NMX-C-159-ONNCCE-2016.

3.4.7.3. CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE GABINETES, CUARTOS HÚMEDOS Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO PARA CONCRETOS HIDRÁULICOS.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.

Tanque de almacenamiento.

Los tanques deben construirse de materiales impermeables y mantener la temperatura dentro del intervalo especificado en todo el volumen del agua.

Los especímenes deben estar separados entre sí por lo menos en 1 cm y de las paredes del tanque no menos de 3 cm. El tirante de agua debe ser como mínimo 2 cm superior a la superficie libre de los especímenes. El elemento calefactor debe estar alejado de los especímenes una distancia no menos de 10 cm.

El agua contenida en el tanque debe mantenerse a la temperatura especificada y estar saturada de cal para prevenir la lixiviación del hidróxido de calcio de los especímenes, de lo contrario puede afectar considerablemente los resultados del ensayo. El contenido mínimo para asegurar la saturación de hidróxido de calcio (CaOH_2) en el agua es de 3.0 gr por litro (3 kg/m^3).

El agua del tanque de almacenamiento debe mezclarse en intervalos no mayores de un mes, esto permite remplazar la concentración de iones de calcio que haya disminuido.

No debe utilizarse en el tanque un flujo de agua corriente o desmineralizada, ya que esto ocasiona una lixiviación muy elevada de hidróxido de calcio que puede afectar el resultado del ensayo.

La limpieza del tanque de almacenamiento se debe realizar como máximo cada 12 meses.

La temperatura del agua especificada en el tanque debe mantenerse de manera constante por medio de resistencias eléctricas sumergibles con termostato análogo o digital o por sistemas de calefacción de agua por medio de combustibles en caso de tanques móviles sin red eléctrica cercana.

Los cuartos o cámaras húmedas, gabinetes y el agua contenida en los tanques de almacenamiento deben estar a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ [100; 101].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C511-13 o NMX-C-148-ONNCCE-2010.

3.4.7.4. CABECEO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO.

3.4.7.4.1. NORMAS.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.

Con compuesto para cabeceo (mortero de azufre).

Calentar para su empleo a una temperatura de $140^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Colocar en los recipientes para el fundido la cantidad necesaria de mortero de azufre para los especímenes por cabecear.

El compuesto para cabeceo fundido debe mantenerse alejado de la humedad, pues al contener agua en el mortero varía la resistencia y comportamiento plástico. El plato y los dispositivos para el cabeceo, deben ser precalentados ligeramente antes de ser empleados impidiendo así choques térmicos que varíen sus propiedades. Antes de vaciar cada capa, se aceite ligeramente el plato de cabeceo para no tener adherencia con el plato.

Las bases de los especímenes curados en forma húmeda deben estar suficientemente secos en el momento del cabeceo, para evitar que dentro de las capas se formen burbujas de vapor o bolsas de espuma que impidan la adherencia con el concreto provocando agrietamientos.

Cuando se utiliza un dispositivo vertical, verter el compuesto para cabeceo sobre la superficie del plato para cabecear, levantar el cilindro por encima del plato y colocar los lados del cilindro con las guías, deslizar el cilindro por las guías sobre el plato para cabecear mientras se mantiene en contacto constante con las guías de alineamiento. El extremo del cilindro debe continuar reposando en el plato para cabecear con los lados del cilindro en contacto con las guías de alineamiento, hasta que el mortero se haya endurecido. Se debe usar suficiente material para cubrir el extremo del cilindro después de que el compuesto para cabecear se solidifica.

Se debe revisar la adherencia de las bases cabeceadas mediante golpeteos con un elemento metálico distribuidos en toda la superficie. Si los cabeceos fallan en satisfacer los requisitos de planicidad o tienen áreas sin adherencia, remover y volver a elaborar los cabeceos[102-104]. Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C617/C617M-15 y ASTM C109/C109M-16 o NMX-C-109-ONNCCE-2013.

3.4.7.5. USO DE CASQUETES NO ADHERIDOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO.

Requisitos para el uso de almohadillas.

Las almohadillas deben ser de material elastomérico como el policloropreno (neopreno).

Preparación.

- Examinar las almohadillas por excesivo desgaste o daño. Cambiar las almohadillas que tengan grietas o ranuras que excedan los 10 mm de longitud, sin importar la profundidad.
- Verificar que el rayado o raspado del perímetro de la almohadilla no reduzca el espesor de la almohadilla alrededor del perímetro.
- Insertar las almohadillas en los platos retenedores antes que sean estos colocados en el cilindro. Algunos fabricantes recomiendan empolverar las almohadillas y las cabezas de los cilindros, con almodón de maíz o talco, antes del ensayo.

Colocación de especímenes.

- Centrar el o los casquetes no adheridos en el cilindro y colocar el cilindro en el bloque de apoyo inferior de la máquina de ensayo indicada en la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE.
- Alinear el eje del cilindro con el centro de carga de la máquina de ensayo indicada en la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE, centrando el casquete superior en el bloque de apoyo de asiento esférico.
- A medida que el bloque esférico es bajado para apoyar en el casquete superior, girar la parte móvil de forma manual, hasta que se obtenga un contacto uniforme.
- Continuar el método de ensayo de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE[105; 106].

Para ver el procedimiento a detalle consultar la normativa ASTM C1231/C1231M-15 o NMX-C-469-ONNCCE-2013.

3.4.7.6. DESARROLLO DE LOS DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO PARA ENSAYOS EXPERIMENTALES DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS.

Los diagramas de interacción se realizaron con los datos obtenidos con los resultados de experimentación, permitiendo establecer las ecuaciones de regresión mediante la formulación matemática que mejor predijo el conjunto de datos de la variable dependiente.

Las líneas de tendencia se determinaron calculando los puntos de estudio (conjunto de variables independientes y dependientes) por el método de ajuste por mínimos cuadrados, utilizando la siguiente ecuación como estructura de su fórmula:

$$y = mx + b$$

Donde:

x, es el valor de la variable independiente

y, es el valor de la variable dependiente

m, es la pendiente de la variable recta

b, es la intersección de la línea recta con el eje vertical

Posteriormente, al obtener todas las expresiones matemáticas ya mencionadas se lograron desarrollar los diagramas de interacción de las propiedades de concreto convencional y con adición de microsílice, comparando tanto métodos destructivos como no destructivos en un sinfín de combinaciones.

De esta forma pudimos observar el comportamiento de las mezclas de concreto y cómo influye la relación agua – material cementante con mezclas con cemento portland compuesto (CPC) y con sustitución de 10% de microsílice.

Los diagramas de interacción de las propiedades del concreto fueron desarrollados en una estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC); utilizando los resultados de los ensayos de laboratorio.

3.5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.5.1. PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.

3.5.1.1. MÉTODO DEL VOLUMEN ABSOLUTO.

3.5.1.1.1. CONDICIONES Y ESPECIFICACIONES.

En este estudio se hicieron diseños de proporcionamiento para dos grupos de mezclas de concreto, los cuales se describen a continuación en la **Tabla 22** y **Tabla 23** de matriz de experimentación.

Tabla 22 - Matriz de experimentación para el primer grupo de mezclas.

Relaciones agua – cemento a utilizar	0.4, 0.5 y 0.6
Tipos de probetas	Prismáticas rectangulares (15x15x50 cm) y Cilíndricas (15x30 cm y 10x20 cm)
Número de probetas prismáticas rectangulares	Tres para cada relación agua – cemento utilizada y edad de ensaye

Número de probetas cilíndricas	Tres para cada relación agua – cemento utilizada y edad de ensaye
Edades de ensaye	28 días

Tabla 23 - Matriz de experimentación para el segundo grupo de mezclas.

Relaciones agua – cemento a utilizar	0.4, 0.5 y 0.6 (sustitución de 10% del contenido de cemento por “microsílice”)
Tipos de probetas	Prismáticas rectangulares (15x15x50 cm) y Cilíndricas (15x30 cm y 10x20 cm)
Número de probetas prismáticas rectangulares	Dos para cada relación agua – cemento utilizada y edad de ensaye
Número de probetas cilíndricas	Tres para cada relación agua – cemento utilizada y edad de ensaye
Edades de ensaye	28 días

Para los dos grupos de mezclas de concreto, no existen datos estadísticos disponibles con los materiales que se utilizó en su diseño y elaboración. Los materiales utilizados para ambas matrices de experimentación se presentan a continuación.

3.5.1.1.1.1. MICROSÍLICE.

En las mezclas con microsílice se utilizó el 10% de sustitución de este material por cemento CPC atendiendo las recomendaciones de la normativa española RC-08, en la cual la proporción de microsílice se limita al 10% en cementos que incorporan otras adiciones como escoria de alto horno, puzolanas naturales, cenizas volantes o calizas.

3.5.1.1.1.2. CEMENTO.

El cemento utilizado es del tipo CPC 30R, el cual cumple con las siguientes especificaciones y tolerancias de componentes expuestos en la siguiente **Tabla 24**.

Tabla 24 - Especificaciones y tolerancias de componentes del cemento CPC 30R en México[107].

Tipo	Denominación	Componentes (% en masa)					
		Principales					Minoritarios
		Clínker Portland + yeso	Escoria Granulada de Alto horno	Materiales Puzolánicos	Microsílice	Caliza	
CPC	Cemento Portland Compuesto	50- 94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5

Se determinó el peso específico del cemento CPC 30R, el cual arrojó un promedio de 3.1.

3.5.1.1.1.3. AGREGADO GRUESO.

El agregado grueso utilizado en este diseño proviene de un banco de materiales ubicado en las mediaciones del Río Culiacán en la ciudad de Culiacán, Sinaloa. Se determinó su análisis granulométrico el cual tiene un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " y se encuentra bien graduado según su curva granulométrica.

Se determinó su densidad relativa aparente seca, arrojando un resultado promedio de 2.49 y una absorción promedio de 2.09%. Su peso volumétrico por varillado promedio es de 1691.4 kg/m³. El material se secó hasta no tener contenido de agua para evitar correcciones por humedad. La distribución granulométrica se muestra en la **Figura 13**.

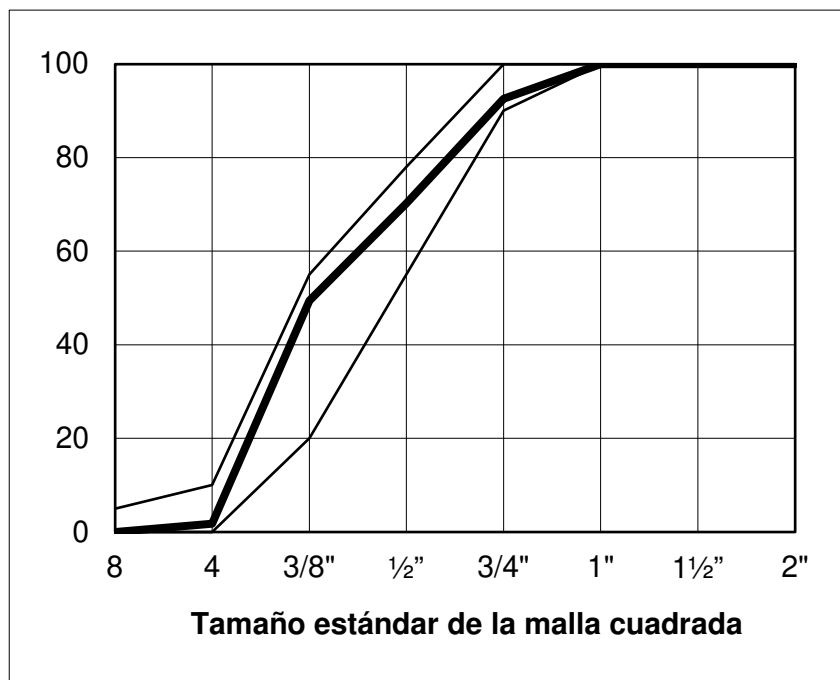


Figura 13 - Distribución granulométrica del agregado grueso.

3.5.1.1.1.4. AGREGADO FINO.

El agregado fino utilizado en este diseño proviene de un banco de materiales ubicado en las mediaciones del Río Culiacán en la ciudad de Culiacán, Sinaloa.

Se determinó su densidad relativa seca arrojando un promedio de 2.63 y absorción de 0.82%. La muestra estudiada en el laboratorio arrojó un promedio de 2.54 de módulo de finura, el material se secó hasta no tener contenido de agua para evitar correcciones por humedad. La distribución granulométrica se muestra en la **Figura 14**.

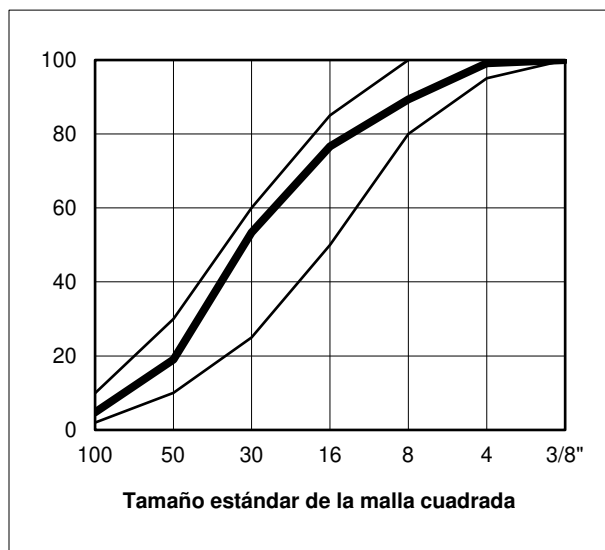


Figura 14 - Distribución granulométrica del agregado fino.

3.5.1.1.5. ADITIVO.

No se utilizó ningún tipo de aditivo en las mezclas de concreto diseñadas.

3.5.1.1.6. RESISTENCIA.

Para ambos grupos de mezcla se tienen tres relaciones de agua – cemento que son 0.4, 0.5 y 0.6. Según la **Figura 8** de relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua – material cementante, para concreto con agregado grueso de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ a 1 pulgada y sin aire incluido, tenemos las siguientes resistencias a compresión de diseño a los 28 días:

- Para la relación agua – cemento de 0.4 tenemos una resistencia de 425 kg/cm^2 .
- Para la relación agua – cemento de 0.5 tenemos una resistencia de 325 kg/cm^2 .
- Para la relación agua – cemento de 0.6 tenemos una resistencia de 250 kg/cm^2 .

3.5.1.1.7. CONTENIDO DE AIRE.

No se consideró contenido de aire para el diseño de mezclas de proporcionamiento de las mezclas de concreto.

3.5.1.1.1.8. REVENIMIENTO.

El revenimiento especificado para los dos diseños de mezclas de proporcionamiento es de 150 mm.

3.5.1.1.1.9. CONTENIDO DE AGUA.

La **Figura 10** recomienda que un concreto de 150 mm de revenimiento, con agregado de 190 mm (3/4 de pulgada) y sin aire incluido debería tener un contenido de agua de 223 kg/m³. Sin embargo, la grava arredondeada puede reducir el contenido de agua recomendado en la **Figura 10** en 25 kg/m³.

Por lo tanto, el contenido de agua se puede estimar en 198 kg/m³.

3.5.1.1.1.10. CONTENIDO DE CEMENTO.

El contenido de cemento se basa en la relación agua – cemento máxima y en el contenido de agua. Por lo tanto, se dividirán los 198 kg/m³ de agua en cada relación agua – cemento (0.4, 0.5 y 0.6) teniendo los siguientes resultados de contenido de cemento:

- Para una relación agua – cemento de 0.4 el contenido de cemento será de 495 kg/m³.
- Para una relación agua – cemento de 0.5 el contenido de cemento será de 396 kg/m³.
- Para una relación agua – cemento de 0.6 el contenido de cemento será de 330 kg/m³.

3.5.1.1.1.11. CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO.

La cantidad de agregado grueso de tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4 de pulgada) se puede estimar a través de la **Figura 9** o la **Tabla 9**. El volumen del agregado grueso recomendado, cuando se usa una arena con módulo de finura de 2.54, es de 0.64.

Como el agregado grueso pesa 1691.4 kg/m³, el peso seco del agregado grueso por metro cúbico de concreto es de $1691.4 \times 0.64 = 1082$ kg.

3.5.1.1.1.12. CONTENIDO DE AGREGADO FINO.

En el método del volumen absoluto, el volumen del agregado fino se determina sustrayendo, de un metro cúbico, los volúmenes absolutos de los ingredientes conocidos. El volumen

absoluto del agua, cemento y agregado grueso se calcula dividiéndose la masa conocida de cada uno de ellos por el producto de su densidad relativa y la densidad del agua. Los cálculos del volumen se presentan a continuación:

$$\text{Agua} = 198 / (1 \times 1000) = 0.198 \text{ m}^3.$$

$$\text{Cemento (relación agua – cemento de 0.4)} = 495 / (3.1 \times 1000) = 0.160 \text{ m}^3.$$

$$\text{Cemento (relación agua – cemento de 0.5)} = 396 / (3.1 \times 1000) = 0.128 \text{ m}^3.$$

$$\text{Cemento (relación agua – cemento de 0.6)} = 330 / (3.1 \times 1000) = 0.106 \text{ m}^3.$$

$$\text{Agregado grueso} = 1082 / (2.49 \times 1000) = 0.434 \text{ m}^3.$$

El volumen total de los ingredientes es de:

- Para una relación agua – cemento de 0.4 de 0.792 m^3 .
- Para una relación agua – cemento de 0.5 de 0.76 m^3 .
- Para una relación agua – cemento de 0.6 de 0.738 m^3 .

El volumen absoluto calculado del agregado fino es:

- Para una relación agua – cemento de 0.4 de $1 - 0.792 \text{ m}^3 = 0.208 \text{ m}^3$.
- Para una relación agua – cemento de 0.5 de $1 - 0.76 \text{ m}^3 = 0.24 \text{ m}^3$.
- Para una relación agua – cemento de 0.6 de $1 - 0.738 \text{ m}^3 = 0.262 \text{ m}^3$.

La masa seca del agregado fino es:

- Para una relación agua – cemento de 0.4 es $0.208 \text{ m}^3 \times 2.63 \times 1000 = 547 \text{ kg}$.
- Para una relación agua – cemento de 0.5 es $0.24 \text{ m}^3 \times 2.63 \times 1000 = 631 \text{ kg}$.
- Para una relación agua – cemento de 0.6 es $0.262 \text{ m}^3 \times 2.63 \times 1000 = 689 \text{ kg}$ [27].

La mezcla entonces tiene las siguientes proporciones, con un metro cúbico de concreto para un revenimiento de 150 mm, expresada en la **Tabla 25**.

Tabla 25 - Proporciones de la mezcla con un metro cúbico de concreto según el diseño de proporcionamiento.

Relación agua – cemento	Agua (kg)	Cemento (kg)	Agregado grueso Seco (kg)	Agregado fino Seco (kg)	Masa total (kg)
0.4	198	495	1082	547	2322
0.5	198	396	1082	631	2307
0.6	198	330	1082	689	2299

3.5.1.1.1.13. MEZCLAS DE PRUEBA.

En esta etapa, las masas estimadas se verificaron a través de mezclas de pruebas o mezclas con el mismo volumen de la revoltura de obra. Se mezcló una cantidad suficiente de concreto para considerar los ensayos de concreto fresco[27].

Para la mezcla de prueba de laboratorio fue conveniente la disminución del volumen para la producción de 0.1 m³ de concreto de cada mezcla. Al obtener datos favorables de revenimientos en todos los casos se procedió a elaborar todas las mezclas de diseño.

3.5.2. RESULTADOS DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DEL CONCRETO FRESCO.

3.5.2.1. TEMPERATURA.

Se determinó la temperatura del concreto fresco a cada una de las mezclas realizadas. Los resultados de temperatura del concreto fresco fueron los siguientes expuestos en la **Tabla 26**.

Tabla 26 – Resultados de temperatura de las mezclas de concreto fresco.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Temperatura (C)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	32.0
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	32.0
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	31.0

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Temperatura (C)
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	31.5
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	31.5
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	31.0

De acuerdo a los resultados, no existen variaciones significativas en las mezclas con adición de microsílice respecto a las de concreto convencional, por lo tanto, se pudo corroborar que la adición de este residuo no influye en la temperatura del concreto en estado fresco.

3.5.2.2. REVENIMIENTO.

Se determinaron pruebas de revenimiento para todas las mezclas de concreto desarrolladas, teniendo como resultados lo descrito en la **Tabla 27**.

Tabla 27 - Parámetros de revenimiento para las mezclas de concreto fresco.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Revenimiento (cm)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	14.5
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	15.0
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	16.0
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	15.5
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	15.5
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	15.5

Todas las mezclas presentaron una adecuada trabajabilidad cumpliendo así con los parámetros para tolerancias de revenimiento indicados en la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010.

3.5.3. RESULTADOS DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DEL CONCRETO ENDURECIDO.

3.5.3.1. PESO VOLUMÉTRICO.

Se determinó el peso volumétrico del concreto endurecido a la edad de 28 días para todas las mezclas. En la **Tabla 28** se presentan los resultados de pesos volumétricos a 28 días de edad para las mezclas de concreto en estudio.

Tabla 28 - Peso volumétrico a 28 días de las mezclas de concreto.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Peso volumétrico a 28 días (kg/m³)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	2461.1
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	2445.6
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	2397.8
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	2373.8
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	2346.4
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	2295.6

De acuerdo a los resultados obtenidos de peso volumétrico, se pudo corroborar que adicionando microsílice y sustituyendo el 10% por cemento, no afecta significativamente al peso volumétrico del concreto respecto a las mezclas con concreto convencional.

3.5.3.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Para las probetas cilíndricas de 15x30 cm, se desarrollaron pruebas de resistencia a la compresión para todas las mezclas de concreto en estudio, estos resultados se reflejan en la **Tabla 29**.

Tabla 29 - Resultados de resistencia a la compresión a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm²)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	271.6
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	269.4
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	249.0
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	295.4
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	280.7
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	253.5

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de resistencia a la compresión a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -113x + 319.83, R^2 = 0.8223, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -209.5x + 381.28, R^2 = 0.9712, \text{ para concreto con microsílice}$$

En la **Figura 15**, se pueden observar los resultados y el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto de las mezclas en estudio a 28 días.

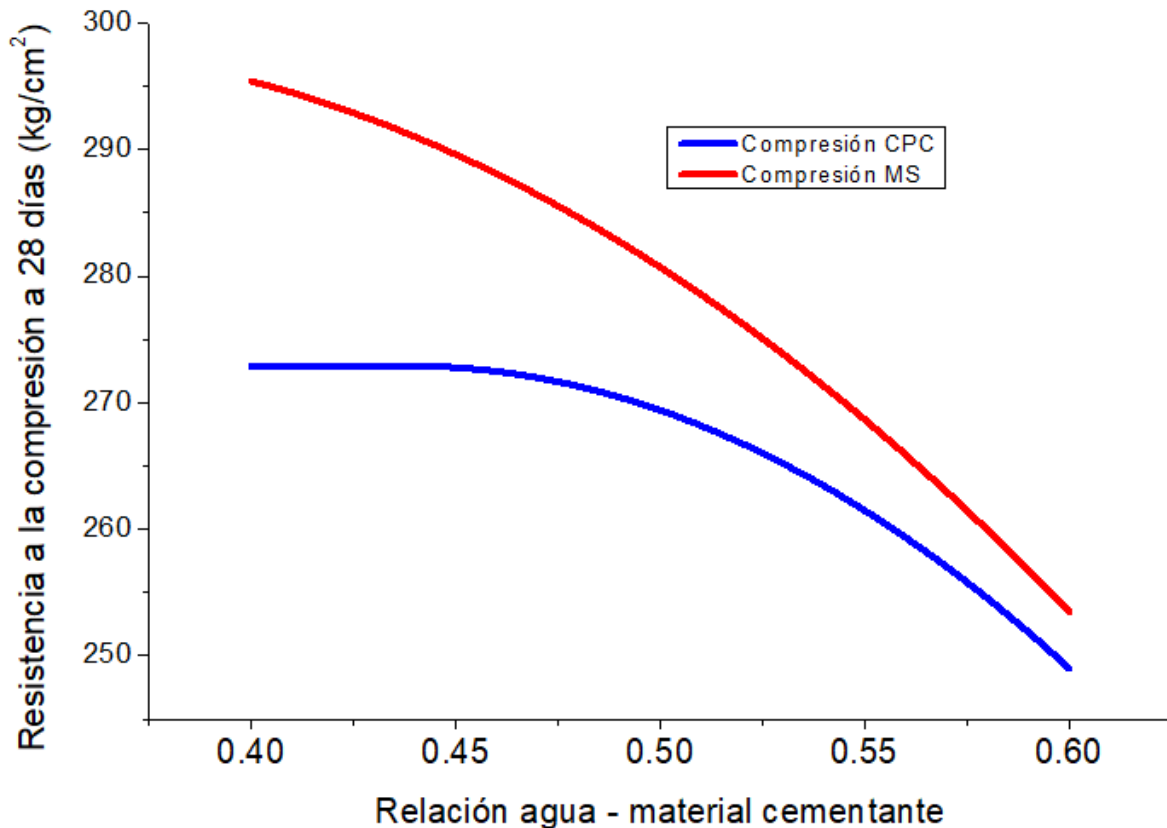


Figura 15 – Diagrama de interacción de los resultados de la resistencia a la compresión del concreto a 28 días de las mezclas en estudio.

Puede observarse que para relaciones agua-material cementante altas, el efecto de la microsílice no es notorio, mientras que para relaciones bajas si es significativo el efecto. Esto indica que el efecto positivo de la microsílice compite con el efecto negativo de un exceso de agua en la mezcla lo cual se traduce en porosidad. A partir de relaciones agua-material cementante de 0.5 es cuando la porosidad contrarresta el efecto de la microsílice.

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.

Para las probetas prismáticas de 15x15x50 cm, se desarrollaron pruebas de resistencia a la flexión a 28 días para todas las mezclas de concreto en estudio. Estos resultados se reflejan en la **Tabla 30**.

Tabla 30 - Resultados de resistencia a la flexión a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Resistencia a la flexión a 28 días (kg/cm²)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	33.3
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	32.0
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	27.8
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento	36.2
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento	34.2
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento	30.2

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de resistencia a la flexión a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -27.5x + 44.783, R^2 = 0.9152, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -30x + 48.533, R^2 = 0.9643, \text{ para concreto con microsilíce}$$

En la **Figura 16**, se pueden observar los resultados y el comportamiento de la resistencia a la flexión del concreto de las mezclas en estudio a 28 días.

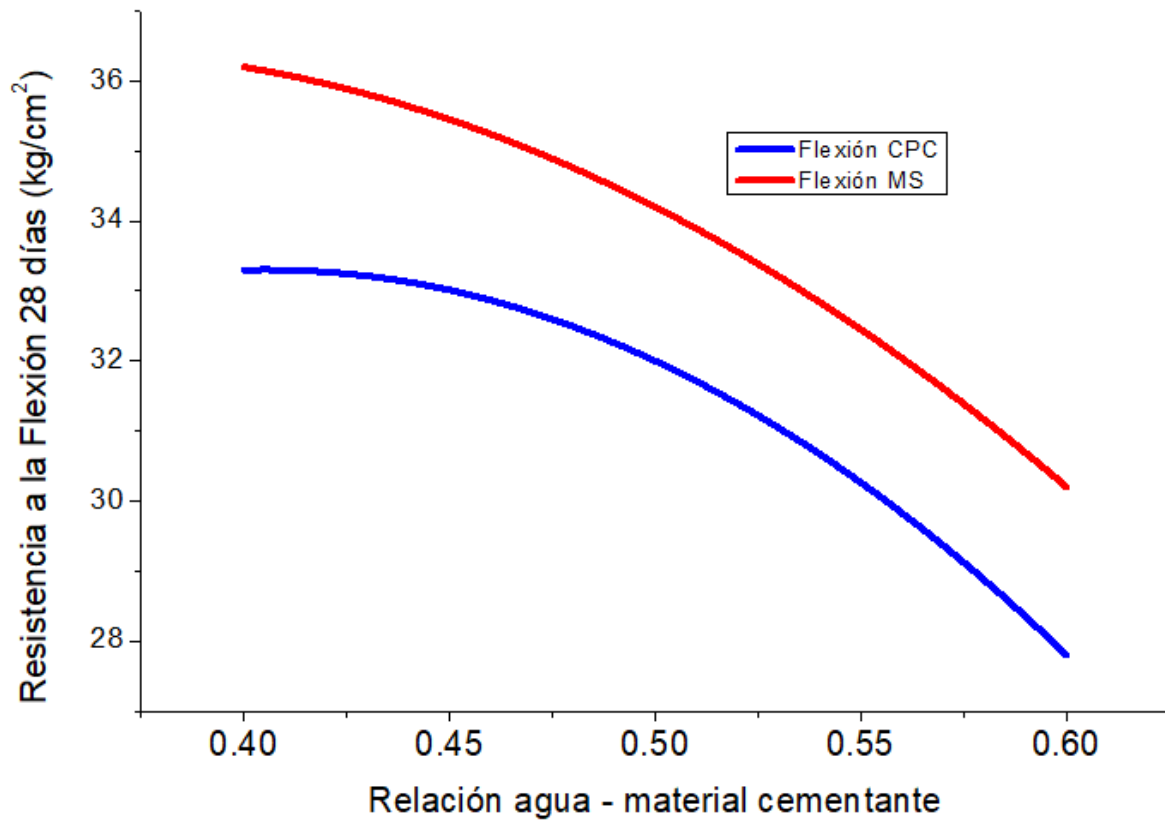


Figura 16 - Diagrama de interacción de los resultados de la resistencia a la flexión del concreto a 28 días de las mezclas en estudio.

Puede observarse que la resistencia a la flexión del concreto mejoró significativamente al utilizar una relación agua – cemento más baja. Los resultados de resistencia a la flexión para las mezclas de concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento, arrojaron un ligero incremento respecto a las mezclas de concreto convencional con cemento CPC.

MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO.

Los ensayos realizados para determinar el módulo de elasticidad estático de las mezclas en estudio de concreto se desarrollaron a la edad de 28 días, en las probetas cilíndricas de 15x30 cm. Los resultados de estos ensayos se reflejan en la **Tabla 31**.

Tabla 31 - Resultados de módulo de elasticidad estático a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Módulo de elasticidad estático a 28 días (kg/cm²)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	260,151
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	251,147
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	232,751
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	287,133
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	263,496
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	242,653

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de módulo de elasticidad estático a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -137000x + 316516, R^2 = 0.9623, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -222400x + 375627, R^2 = 0.9987, \text{ para concreto con microsílice}$$

En la **Figura 17**, se pueden observar los resultados y el comportamiento del módulo de elasticidad estático del concreto de las mezclas en estudio a 28 días.

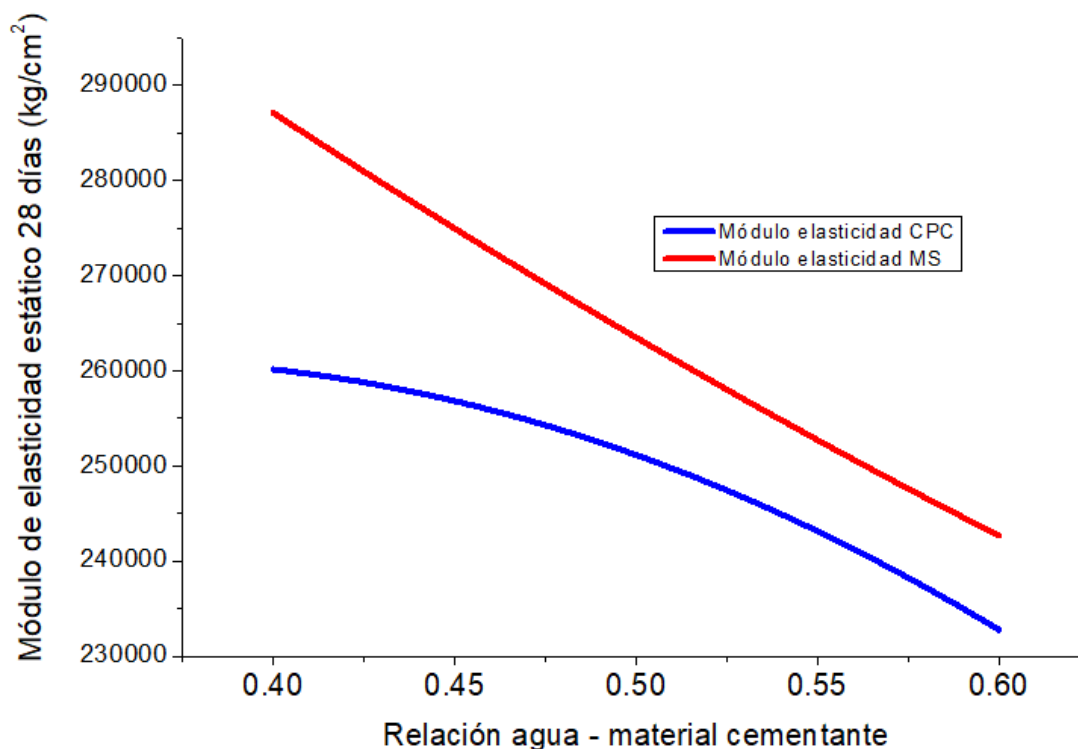


Figura 17 - Diagrama de interacción de los resultados de módulo de elasticidad estático del concreto a 28 días para las mezclas en estudio.

Se observa que el módulo de elasticidad del concreto se incrementó cuando se utilizó una relación agua – cemento baja, teniendo como punto de inflexión la relación de 0.5. Los resultados de módulo de elasticidad estático para las mezclas de concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento, presentaron un incremento significativo para relaciones agua-material cementante cercanas a 0.4, mientras que para relaciones altas el efecto de la microsílice es ligeramente notorio.

Al igual que el comportamiento a compresión y flexión, el comportamiento elástico del concreto está directamente relacionado con la cantidad de gel CSH y la porosidad generada al interior del concreto. Es por ello que a mayores relaciones agua-material cementante (mayor porosidad) las propiedades mecánicas se ven disminuidas; por otro lado, al adicionar microsílice al concreto, su efecto químico (reacción puzolánica que contribuye a la formación de mayor cantidad de gel CSH) y su efecto físico (refinamiento de porosidad con partículas de microsílice sin reaccionar) toman lugar y contribuyen a un mejor desempeño mecánico.

VOLUMEN DE POROS PERMEABLES.

Los ensayos realizados para determinar el volumen de poros permeables de las mezclas en estudio de concreto se desarrollaron a la edad de 28 días, en las probetas cilíndricas de 10x20 cm. El procedimiento de este ensayo es el de prueba de masa específica, absorción y vacíos. Los resultados de estos ensayos se reflejan en la **Tabla 32**.

Tabla 32 - Resultados de volumen de poros permeables a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Volumen de poros permeables a 28 días (%)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	10.83
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	11.83
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	12.95
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	9.07
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	9.99
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	12.27

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de volumen de poros permeables del concreto a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -10.6x + 6.57, R^2 = 0.9989, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -16x + 2.4433, R^2 = 0.9432, \text{ para concreto con microsílice}$$

En la **Figura 18**, se pueden observar los resultados y el comportamiento del volumen de poros permeables del concreto de las mezclas en estudio a 28 días.

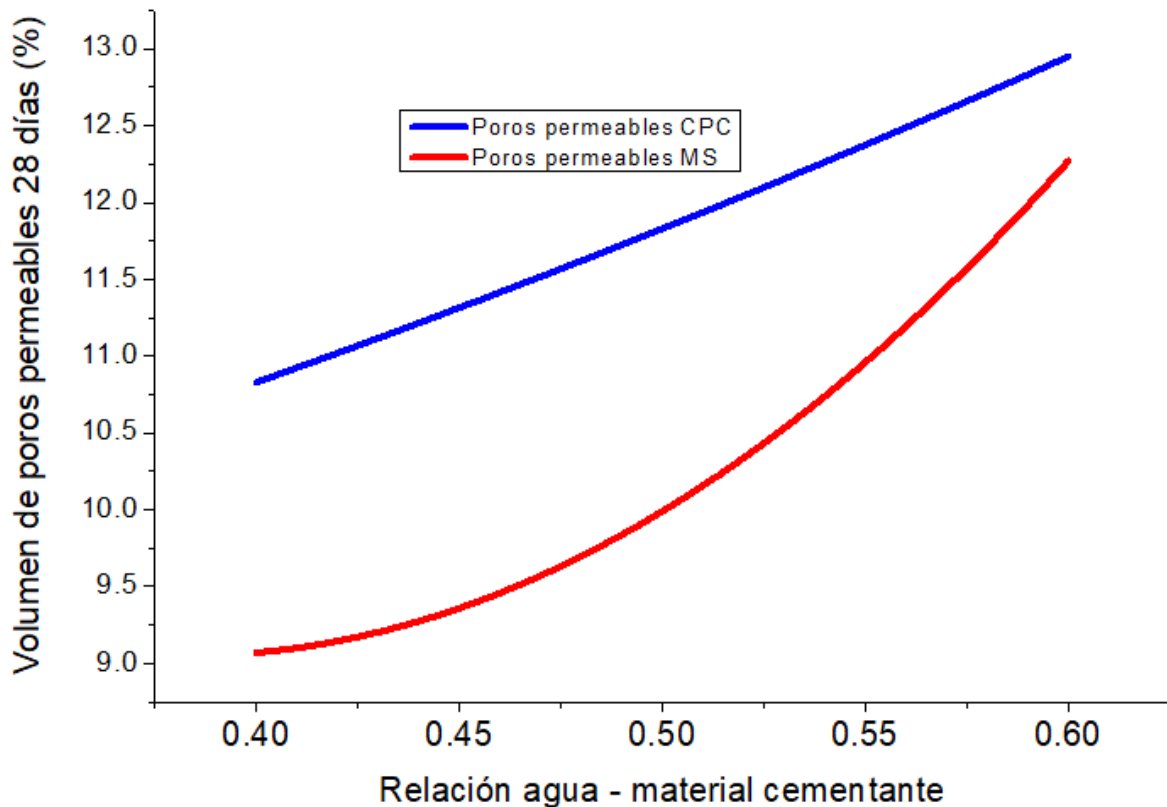


Figura 18 - Diagrama de interacción de los resultados de volumen de poros permeables en el concreto a 28 días para las mezclas en estudio.

En la figura puede notarse que a menor relación agua – cemento en el concreto, el volumen de poros permeables disminuye, en cambio a mayor agua utilizada y mayor sangrado de las probetas el agua al salir en el fenómeno de fraguado del concreto provocó más rutas de salida y por consecuencia mayor porosidad. Los resultados de volumen de poros permeables para las mezclas de concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento, presentaron una disminución respecto a las mezclas de concreto convencional con cemento CPC.

Estos resultados de porosidad dan soporte y son coherentes con los resultados de las propiedades mecánicas estudiadas, confirmando los efectos químico y físico de la microsilíce en el concreto. De igual manera que las propiedades mecánicas, a relaciones agua-material cementante altas el efecto de la microsilíce es contrarrestado por la alta cantidad de agua en la mezcla que al fraguar el material es expulsada hacia la superficie dejando alta porosidad capilar.

3.5.3.3. RESULTADOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

NÚMERO DE REBOTE MEDIANTE ESCLERÓMETRO.

Se realizaron ensayos de número de rebote mediante esclerómetro para todas las mezclas de concreto en estudio para las probetas cilíndricas de 15x30 cm. Los ensayos se realizaron a 28 días de edad, estos resultados se reflejan en la **Tabla 33**. Para los ensayos, se utilizó un esclerómetro marca Controls modelo 58-00481/N.

Tabla 33 - Resultados de número de rebote a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Número de rebote a 28 días
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	28.0
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	26.5
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	24.0
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	31.5
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	29.5
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	25.0

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de número de rebote a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -20x + 36.167, R^2 = 0.9796, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -32.5x + 44.917, R^2 = 0.9530, \text{ para concreto con microsílice}$$

En la **Figura 19** se muestra gráficamente la relación entre la relación agua-material cementante y el número de rebote.

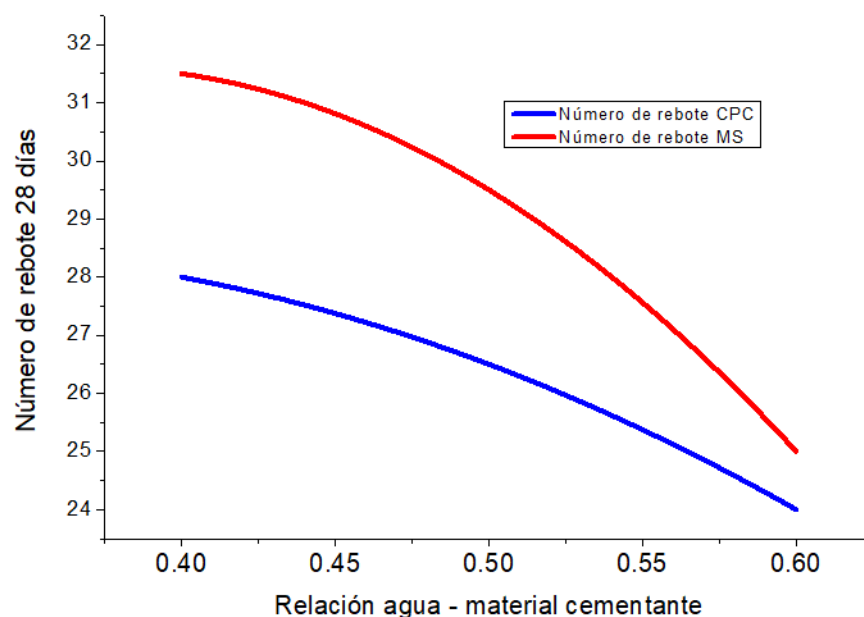


Figura 19 - Diagrama de interacción de los resultados de número de rebote del concreto a 28 días de las mezclas en estudio.

Puede observarse en la figura que el número de rebote del concreto incrementó al utilizar una relación agua – cemento menor, dejando así la superficie de las probetas de concreto con mayor resistencia. En las mezclas de concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento existió un incremento mayor en el número de rebote con respecto al concreto convencional.

FRECUENCIA FUNDAMENTAL TRANSVERSAL (MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO).

Los ensayos realizados para determinar la frecuencia fundamental transversal (módulo de elasticidad dinámico) se desarrollaron a la edad de 28 días, en las probetas cilíndricas de 15x30 cm. Los resultados de estos ensayos se reflejan en la **Tabla 34**.

Tabla 34 - Resultados de módulo de elasticidad dinámico a partir de la frecuencia fundamental transversal del concreto a 28 días.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm ²)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	265,925
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	255,828

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm²)
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	242,351
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	299,191
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	274,800
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	249,160

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de módulo de elasticidad dinámico a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -117870x + 313636, R^2 = 0.9932, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -250155x + 399461, R^2 = 0.9998, \text{ para concreto con microsílice}$$

En la **Figura 20**, se pueden observar los resultados y el comportamiento del módulo de elasticidad estático del concreto de las mezclas en estudio a 28 días.

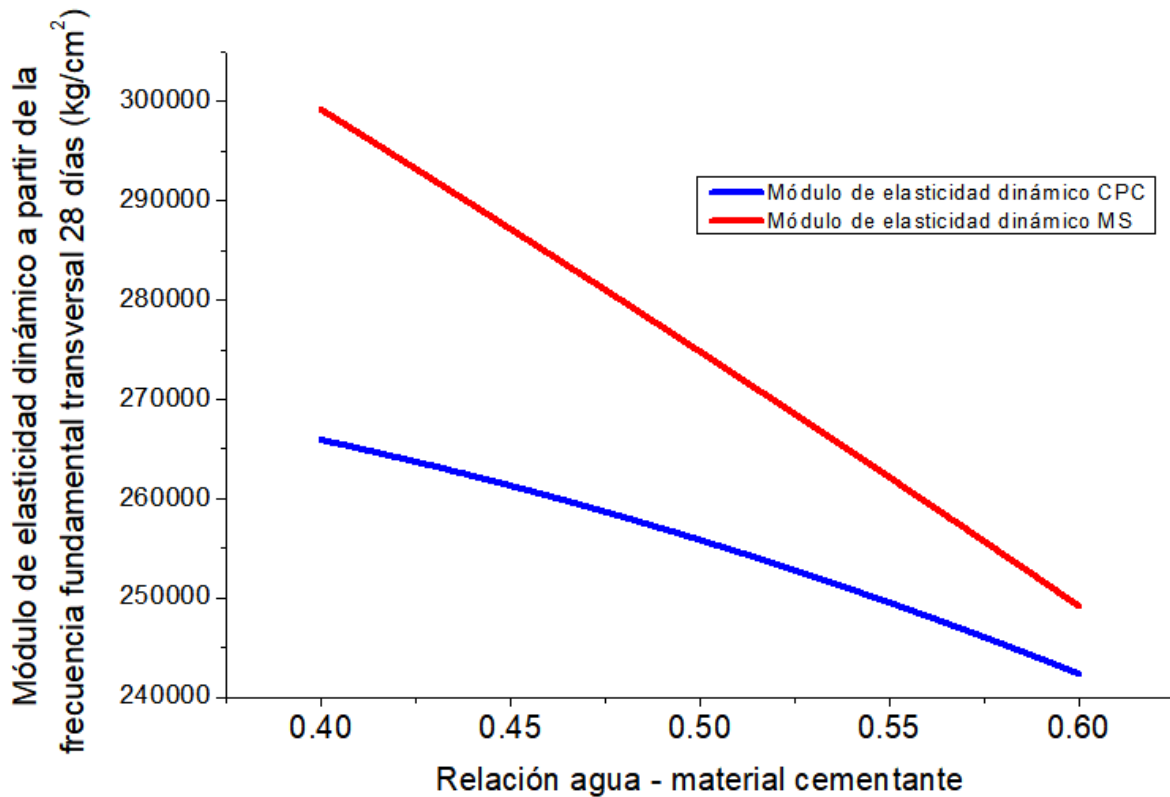


Figura 20 - Diagrama de interacción de los resultados de módulo de elasticidad dinámico a partir de la frecuencia fundamental transversal del concreto a 28 días.

Puede observarse que el módulo de elasticidad dinámico presentó una tendencia muy similar al módulo de elasticidad estático, tanto para el concreto convencional como para el concreto con microsílíce. Las causas de este comportamiento son las mismas que se discutieron para el módulo de elasticidad estático.

También se observa que, con el método dinámico, los valores del módulo de elasticidad resultan ligeramente superiores (aproximadamente 2%) a los valores resultantes por el método estático.

VELOCIDAD DE PULSO POR ULTRASONIDO.

Los ensayos de velocidad de pulso por el método de ultrasonido fueron desarrollados para todos los tipos de mezclas a 28 días. Estos se realizaron a las probetas de 15x30 cm cilíndricas y los resultados están en la **Tabla 35**.

Tabla 35 - Resultados de velocidad de pulso a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Velocidad de pulso a 28 días (m/s)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	2911
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	2567
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	2199
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	3017
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	2959
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	2401

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de velocidad de pulso a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -3560x + 4339, R^2 = 0.9996, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -3080x + 4332.3, R^2 = 0.8199, \text{ para concreto con microsílice}$$

En la **Figura 21** se muestran gráficamente los resultados de velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la relación agua-material cementante.

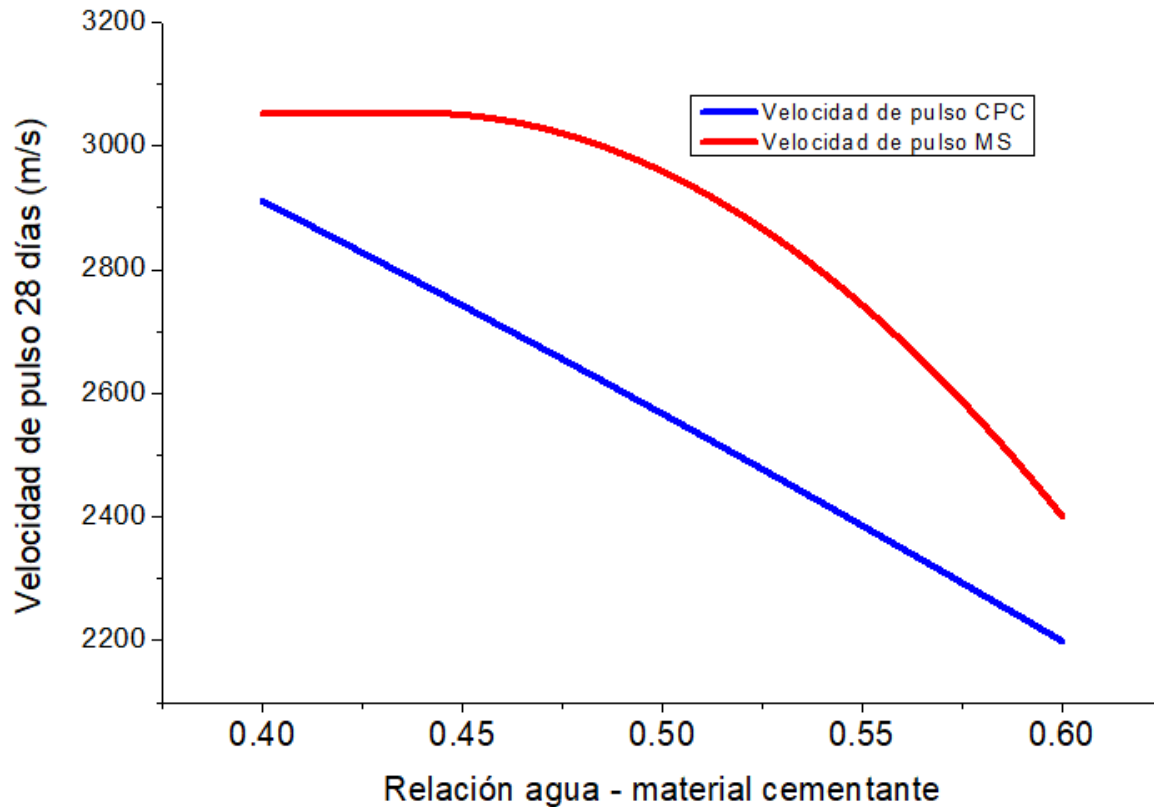


Figura 21 - Diagrama de interacción de los resultados de velocidad de pulso a 28 días.

Se observa que la velocidad de pulso se incrementó al utilizarse una relación agua – cemento menor, lo cual tiene sentido considerando que la porosidad es menor y hay mayor facilidad para que la onda ultrasónica recorra en menor tiempo la longitud de la probeta. En el concreto con microsilíce, el cual es menos poroso que el concreto convencional, la velocidad de pulso en general es considerablemente mayor. Sin embargo, se observa que para la relación de 0.4 no existe diferencia significativa, lo cual es atribuible a un valor inusitado puesto que, para esa relación baja, la porosidad también es baja y la velocidad de pulso debiera ser más alta.

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

Los ensayos de resistividad eléctrica fueron realizados a la edad de 28 días en las probetas de 10x20 cm, para las mezclas de concreto convencional con cemento CPC y mezclas con sustitución de 10% de microsilíce por cemento.

Los resultados de los ensayos de resistividad eléctrica se pueden apreciar en la **Tabla 36**.

Tabla 36 - Resultados de resistividad eléctrica a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Resistividad eléctrica a 28 días (kΩ-cm)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	10.05
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	8.60
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	8.25
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	22.62
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	14.33
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsílice por cemento	14.18

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de resistividad eléctrica a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = -9x + 13.467, R^2 = 0.8893, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = -42.2x + 38.143, R^2 = 0.7633, \text{ para concreto con microsílice}$$

El comportamiento de estos resultados, se puede observar de forma gráfica en la **Figura 22**.

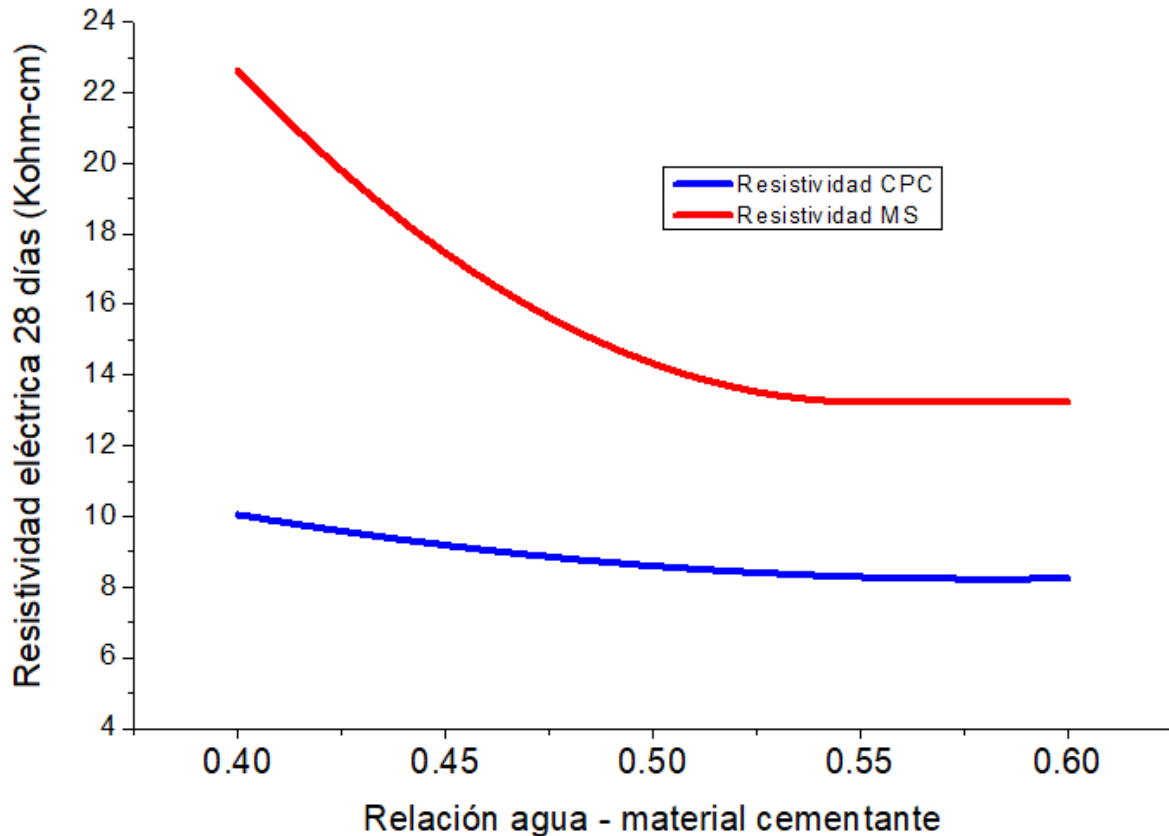


Figura 22 - Diagrama de interacción de los resultados de resistividad eléctrica a 28 días.

En general puede observarse que en el concreto convencional hay un ligero incremento en la resistividad eléctrica en la medida que la relación agua-cemento disminuye. Para el concreto con microsílice el incremento es mucho más notorio. El hecho de que el concreto con microsílice presente una mayor resistividad eléctrica con respecto al concreto convencional, se debe principalmente a la alta refinación de poros (reducción de la porosidad capilar) por el efecto físico de la microsílice al rellenar los poros capilares y obstaculizar u oponer mayor resistencia al flujo de corriente eléctrica. Es sabido que la corriente eléctrica fluye a través de los iones disueltos en agua (electrolito); en este caso el electrolito es la solución acuosa rica en iones calcio contenida en los poros capilares. De tal manera que al haber menor porosidad capilar (a menor relación agua-material cementante y ante el efecto filler de la microsílice), habrá mayor resistividad eléctrica que es lo contrario a la conductividad eléctrica.

MIGRACIÓN DE CLORUROS.

A la edad de 28 días en las probetas de 5x10 cm rebanadas de probetas de 10x20 cm se realizaron los ensayos de migración de cloruros, para las mezclas de concreto convencional con cemento CPC y mezclas con sustitución de 10% de microsilíce por cemento. Los resultados de migración de cloruros los tenemos en la **Tabla 37**.

Tabla 37 - Resultados de migración de cloruros a 28 días de edad.

Relación agua – cemento	Tipo de concreto	Migración de Cloruros a 28 días (m ² /s)
0.4	Concreto convencional con cemento CPC 30R	17.56
0.5	Concreto convencional con cemento CPC 30R	22.38
0.6	Concreto convencional con cemento CPC 30R	24.06
0.4	Concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento	5.23
0.5	Concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento	13.48
0.6	Concreto con sustitución de 10% de microsilíce por cemento	15.04

Las ecuaciones de regresión con sus coeficientes de determinación desarrollados con los resultados obtenidos de migración de cloruros a la edad de 28 días son las siguientes:

$$y = 32.5x + 5.0833, R^2 = 0.9278, \text{ para concreto convencional}$$

$$y = 49.05x - 13.275, R^2 = 0.8658, \text{ para concreto con microsilíce}$$

En la **Figura 23**, se observa gráficamente el comportamiento de estos resultados.

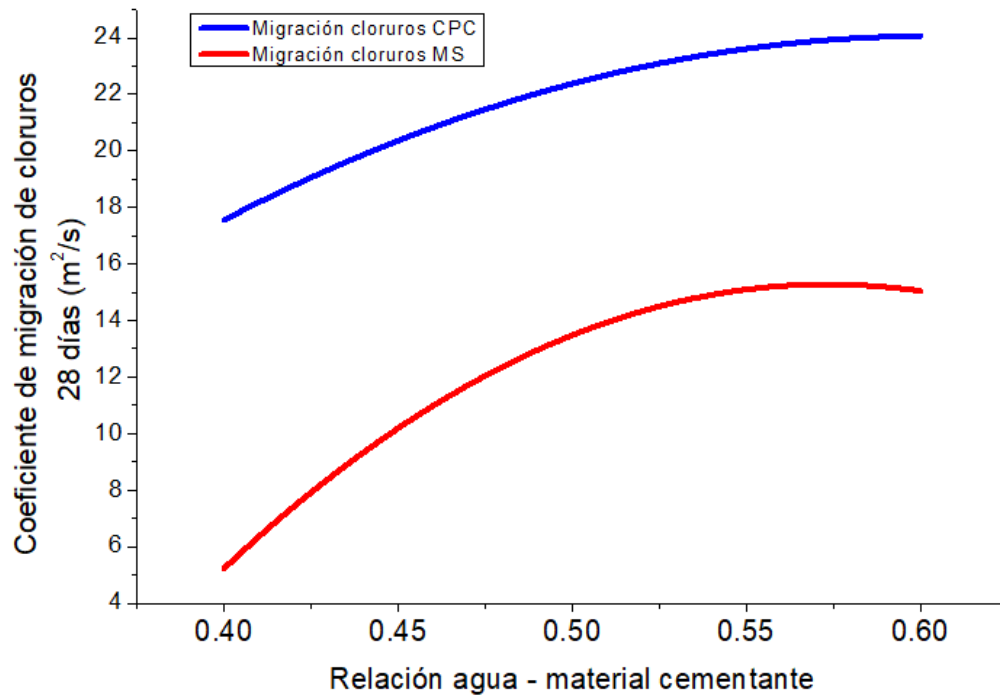


Figura 23 - Diagrama de interacción de los resultados de migración de cloruros a 28 días.

Se observa en general que el concreto con microsilíce presenta una reducción muy importante en el coeficiente de migración de cloruros con respecto al concreto convencional. También puede apreciarse que, para ambos tipos de concreto, a medida que aumenta la relación agua-material cementante, el coeficiente de migración de cloruros también se incrementa. Este comportamiento obedece a lo mismo que el comportamiento de la resistividad eléctrica ya que los iones cloruros de esta prueba se forzan a migrar a través de la solución acuosa del concreto mediante la aplicación de un potencial eléctrico que produce una corriente eléctrica. De tal manera que cuando menos poroso sea el material, menor será el coeficiente de migración de cloruros.

3.5.4. DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN TRIPLES PARA CORRELACIONAR PROPIEDADES.

A partir de los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos tanto en concreto convencional como en concreto con microsilíce, se elaboraron diagramas de interacción triples para hacer correlaciones de tres variables de las mezclas de concreto en estudio.

En la **Figura 24** se muestra el diagrama que refleja la interacción entre la relación agua-material cementante con la resistencia a compresión y la resistencia a flexión.

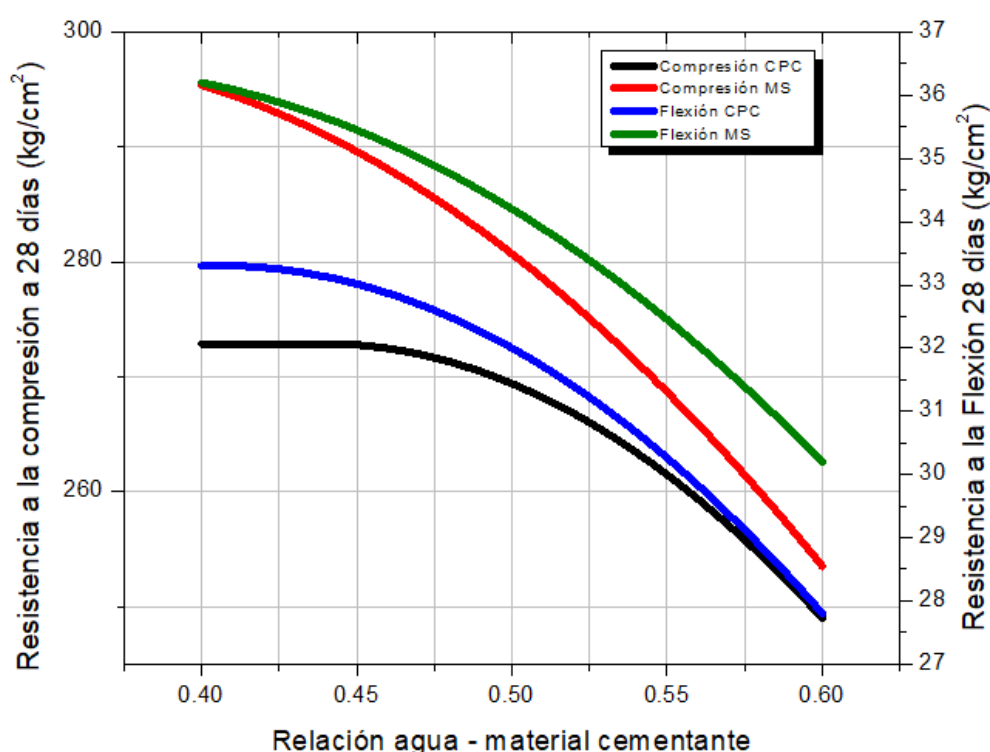


Figura 24 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y flexión a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

Puede observarse en este diagrama que la variable relación agua-material cementante influye de igual manera en las dos propiedades mecánicas y se observa también que ambas propiedades mecánicas (y para ambos tipos de concreto) están estrechamente relacionadas de modo que determinando una de ellas se podría inferir la otra con mucha precisión. La relación aproximada cuantitativa es que la resistencia a flexión representa entre el 8 y 12%

de la resistencia a compresión, lo cual es consistente con el rango manejado en las formulaciones de ACI y otros códigos de diseño.

En la **Figura 25** se presenta el diagrama que muestra la interacción entre la relación agua-material cementante con la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad estático.

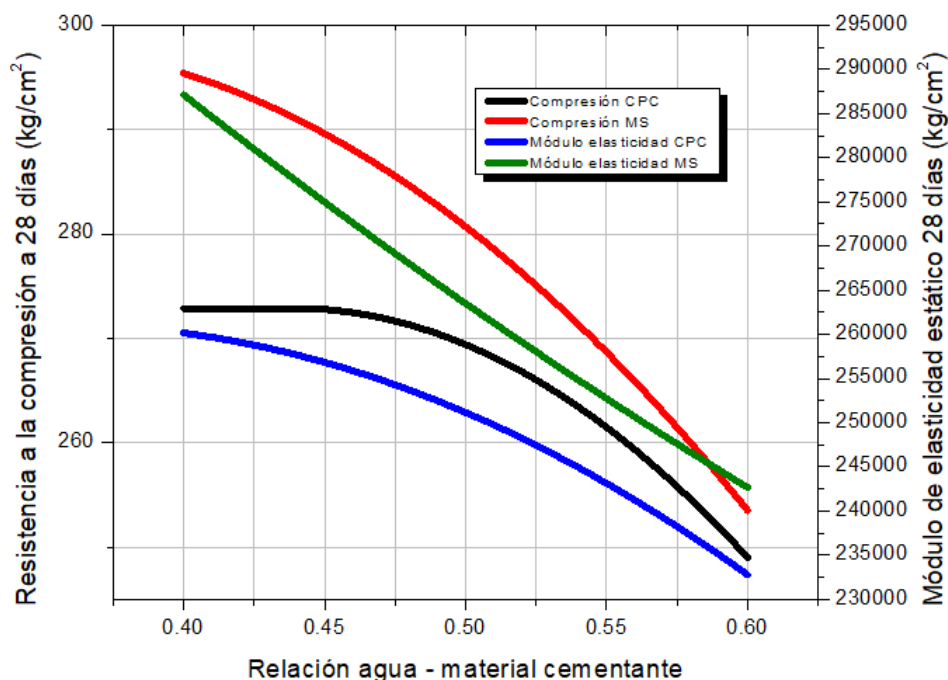


Figura 25 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad estático a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

Se observa en este diagrama que la variable relación agua-material cementante influye de igual manera en las dos propiedades mecánicas. Se observa también que sólo para el concreto convencional las dos propiedades mecánicas están estrechamente relacionadas entre sí de modo que a partir de la determinación de una de ellas se podría inferir la otra con mucha precisión. Para el caso del concreto con microsílíce, la relación entre las dos propiedades mecánicas es diferente y menos estrecha.

En la **Figura 26** es el diagrama que muestra la interacción entre la relación agua-material cementante con la resistencia a compresión y el volumen de poros permeables.

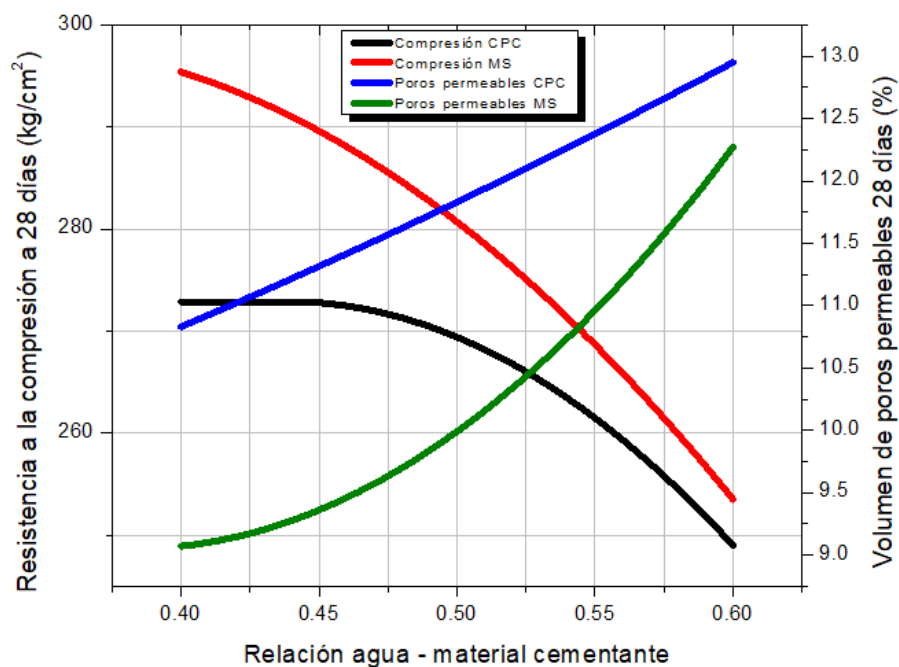


Figura 26 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y el volumen de poros permeables a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

Se observa en este diagrama que, para ambos tipos de concreto, la relación entre resistencia a compresión y porosidad es inversa. También es notorio que el punto de inflexión a partir de donde el efecto del microsilíce se potencia al máximo es la relación agua-material cementante de 0.5. El mismo comportamiento resultó para las demás propiedades mecánicas estudiadas (resistencia a flexión y módulo de elasticidad).

En la **Figura 27** es el diagrama que muestra la interacción entre la relación agua-material cementante con la resistencia a compresión y el número de rebote.

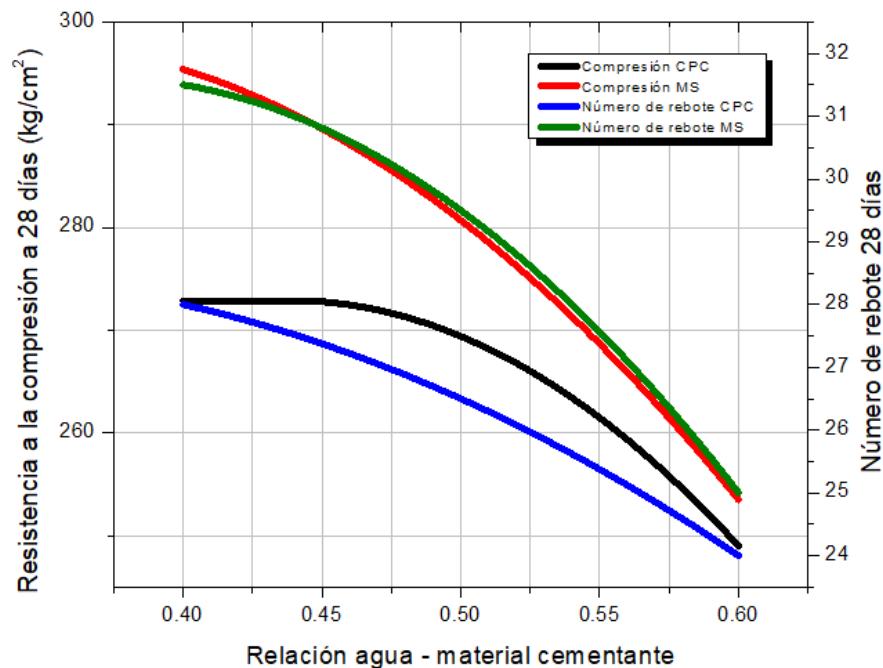


Figura 27 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

Se puede apreciar en esta figura una estrecha relación entre el número de rebote con la resistencia a compresión, mucho más notoria para el concreto con microsilíce. De esto se puede inferir que el concreto con microsilíce tiene una microestructura de mayor homogeneidad, lo cual hace que los resultados de índice de rebote tengan menos variación independientemente del punto donde se determine. Es posible también establecer que el factor aproximado de conversión de número de rebote a resistencia a compresión es de 10 para relaciones agua-material cementante medias y altas (Un número de rebote de 25 representaría una resistencia a compresión estimada de 250 kg/cm²). Para el caso de resistencia a flexión, se observa la misma tendencia a diferencia que el factor de conversión es aproximadamente de 1.1.

En la **Figura 28** se presenta la relación entre velocidad de pulso ultrasónico, volumen de poros permeables y relación agua-material cementante.

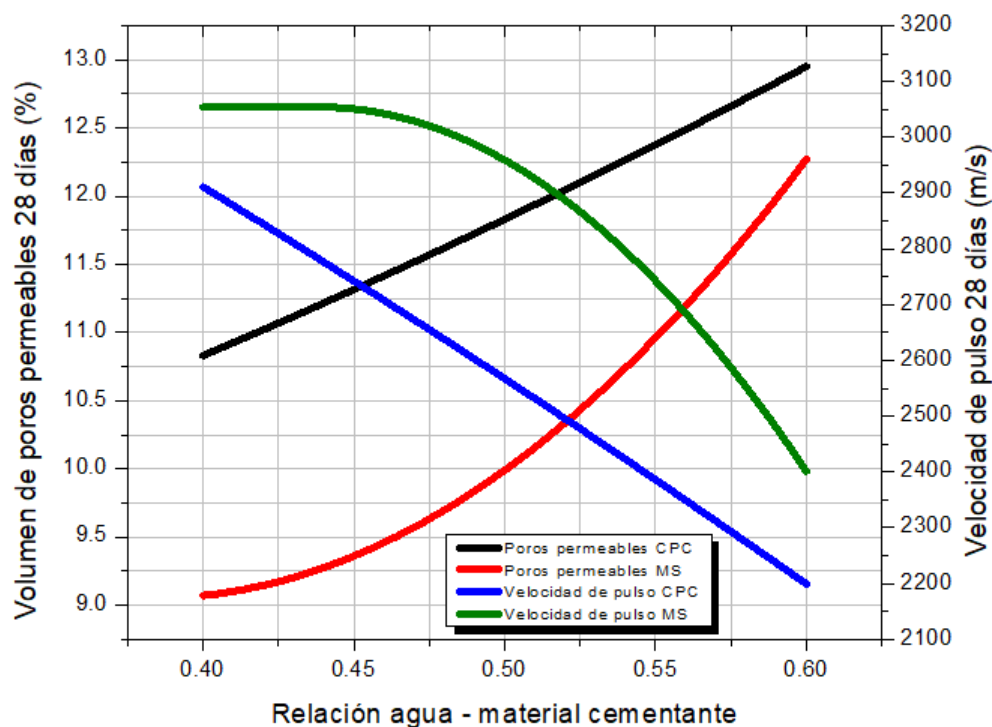


Figura 28 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

Cabe destacar en esta figura la relación tan estrecha que existe entre la porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico para ambos tipos de concreto. Esto significa que es de mucha confiabilidad y precisión el estimar la porosidad del concreto a través de un ensayo rápido como el de velocidad de pulso ultrasónico. Una vez estimada la porosidad, con la ayuda del respectivo diagrama, se podría estimar con mucha precisión cualquiera de las otras propiedades mecánicas (resistencia a flexión y módulo de elasticidad).

En las **Figura 29** y **Figura 30** se presentan las relaciones entre los principales parámetros de durabilidad con respecto a la relación agua-material cementante y la porosidad.

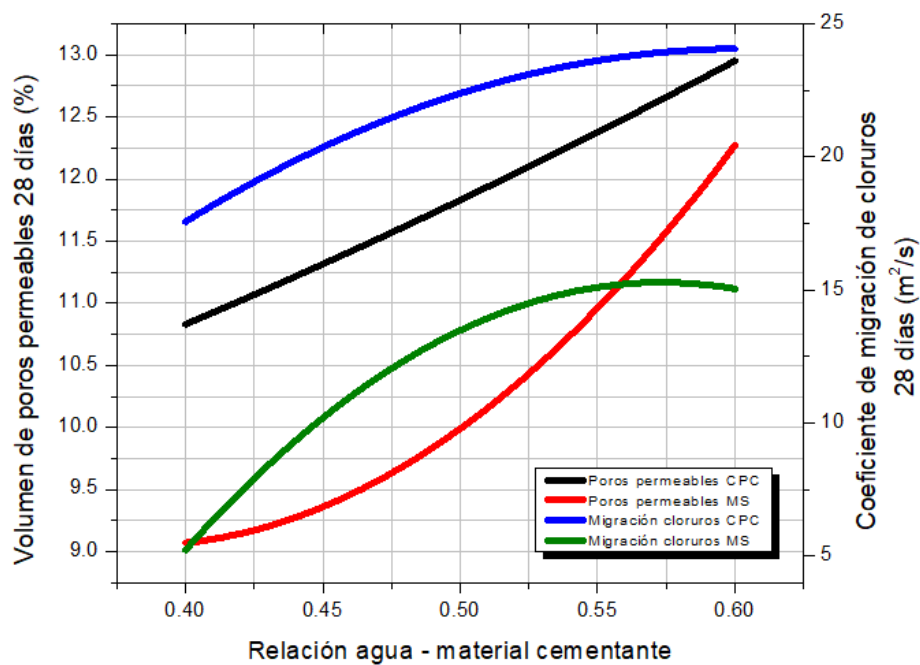


Figura 29 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

Para el caso del coeficiente de migración de cloruros, es evidente la relación directa con la porosidad, es decir, que a medida que la porosidad aumenta (por un incremento de la relación agua-material cementante) también aumenta el coeficiente de migración de cloruros.

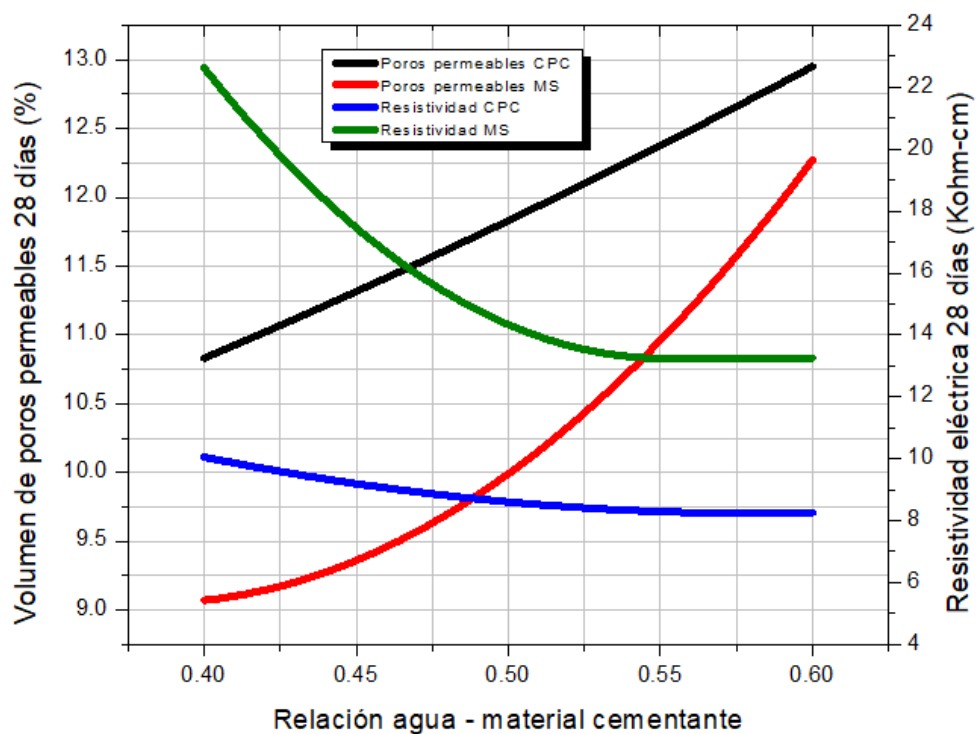


Figura 30 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

En cuanto a la resistividad eléctrica, la relación que presenta con respecto a la porosidad es inversa, es decir, que a medida que la porosidad es menor, la resistividad eléctrica crece.

Mediante el análisis de estas dos figuras es posible identificar a la porosidad (dependiente de la relación agua-cemento) como el factor gobernante tanto de la resistividad eléctrica como del coeficiente de migración de cloruros.

En la **Figura 31** se presenta la relación entre los resultados de dos métodos no destructivos con respecto a la resistencia a compresión obtenida por ensayo destructivo.

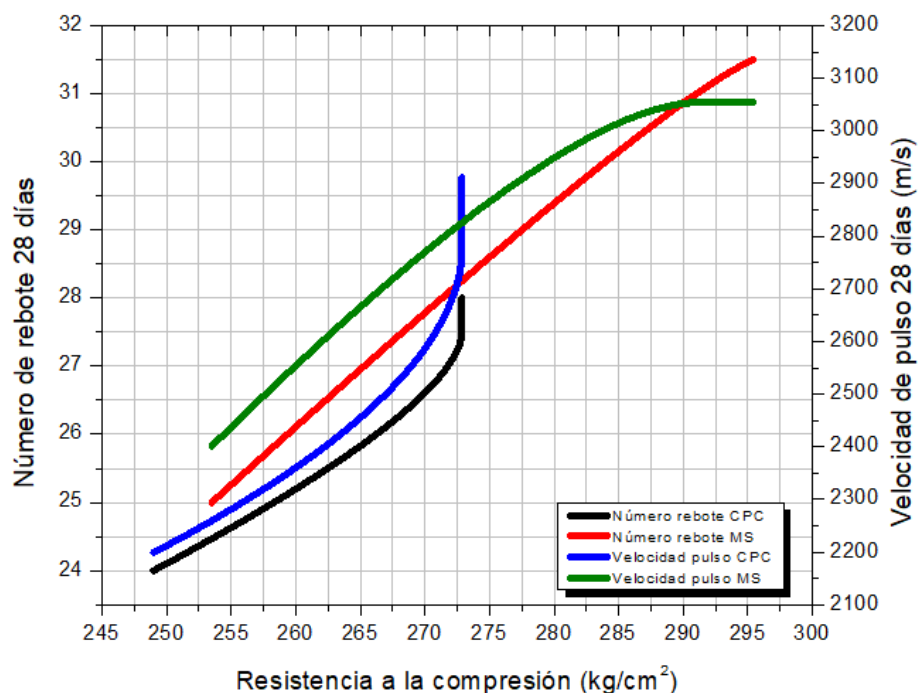


Figura 31 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y velocidad de pulso a 28 días, en función de la resistencia a la compresión.

Es posible observar en esta figura que existe una muy buena correlación entre las tres variables, lo cual significa que llevando a cabo dos ensayos no destructivos (rápidos, in situ y económicos) es posible estimar con mucha precisión la resistencia a compresión del concreto, la cual actualmente es el principal parámetro de control de calidad de las estructuras de concreto.

Un resumen general de los resultados discutidos y meramente indicativo se muestra en la **Tabla 38**.

Tabla 38 - Comportamiento de las propiedades del concreto en estudio a menor relación agua - cemento.

Propiedad o variable medida	Comportamiento
Resistencia a la compresión	Aumenta
Resistencia a flexión	Aumenta
Módulo de elasticidad estático	Aumenta
Volumen de poros permeables	Disminuye

Propiedad o variable medida	Comportamiento
Número de rebote	Aumenta
Módulo de elasticidad dinámico	Aumenta
Velocidad de pulso	Aumenta
Migración de cloruros	Disminuye
Resistividad eléctrica	Aumenta

Haciendo un análisis general de los resultados obtenidos y las correlaciones hechas, se puede observar que a medida que la mezcla de concreto (convencional y con microsílice) contiene mayor cantidad de agua de mezclado (mayor relación agua-material cementante), las propiedades mecánicas tales como resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad se ven disminuidas, mientras que los índices de durabilidad relacionados con la porosidad del concreto como son volumen de poros permeables, velocidad de pulso, coeficiente de migración de cloruros y resistividad eléctrica se comportan también desfavorablemente para la durabilidad. Otra situación que se observa es que los resultados obtenidos por ensayos no destructivos muestran una muy buena correlación con los resultados obtenidos por métodos destructivos. Además, es notorio el efecto positivo de la adición de 10% de microsílice a la mezcla de concreto, resultando en un concreto con mejor desempeño en cuanto a propiedades mecánicas y en cuanto a índices de durabilidad.

Por último, se logra apreciar que la variable independiente que gobierna el comportamiento de los demás resultados es la porosidad del concreto (volumen de poros permeables), misma que en la práctica se manipula con la relación agua-material cementante de una mezcla.

4. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN.

4.1. PLAN DE ACCIÓN.

Para lograr que los diagramas elaborados se puedan implementar como apoyo al control de calidad del concreto en la construcción y como apoyo en las auscultaciones de algunas estructuras en servicio, se desarrolló una aplicación para móvil en el sistema operativo Android donde se cargaron los resultados obtenidos y las ecuaciones de correlación.

En esta aplicación, el usuario podrá correlacionar algunas de las propiedades del concreto tanto para ensayos destructivos y no destructivos con sólo proporcionar ciertos datos, considerando las condiciones experimentales que se utilizaron para el desarrollo de las mezclas de concreto utilizadas en este proyecto.

La aplicación consiste de una vista principal donde se informan las condiciones experimentales bajo las cuales se obtuvieron los resultados (ver **Figura 32**).

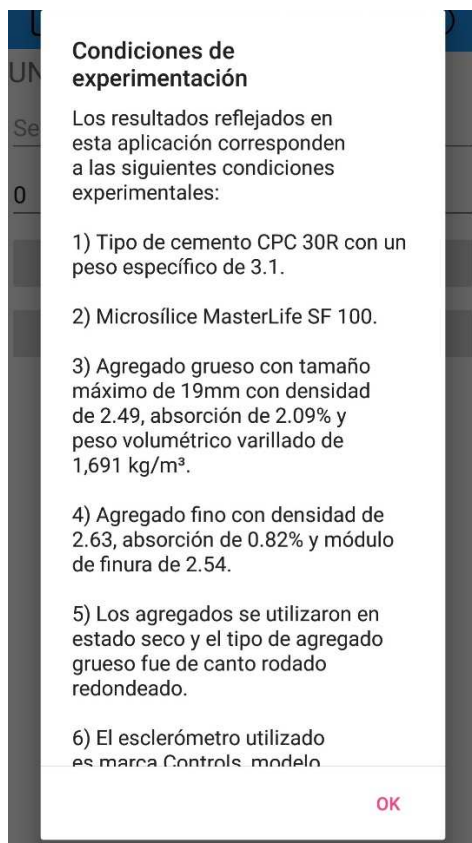


Figura 32 - Captura de pantalla inicial de la aplicación.

La segunda vista consiste en calcular correlaciones de distintas propiedades del concreto respecto a un valor de relación agua – material cementante. También se puede correlacionar la resistencia a la compresión con la resistencia a la flexión. Estos cálculos se basan en los diagramas de interacción presentados en esta investigación (ver **Figura 33**).

1	
UNA VARIABLE	
Correlaciones con relación A/C	
0.55	
CEMENTO CPC	
10% MICROSÍLICE	
Riesgo de penetración de cloruros	
	Moderado
Compresión 28 Días (kg/cm ²)	261.5
Flexión 28 Días (kg/cm ²)	30.3
Volumen de poros permeables 28 Días (%)	12.4
Módulo de elasticidad 28 Días (kg/cm ²)	243123.0
Número de rebote 28 Días	25.4

Figura 33 - Captura de pantalla de la segunda vista (pestaña uno).

La tercera vista consiste en correlacionar la resistencia a la compresión del concreto, la cual es el estándar actual para evaluar la calidad combinando dos métodos no destructivos de número de rebote y velocidad de pulso ultrasónico (ver **Figura 34**).

MÉTODOS COMBINADOS

Número de Rebote

26

Velocidad de Pulso

2990

CALCULAR

Compresión CPC

224.9

Compresión 10% Microsilíce

253.2

Figura 34 - Captura de pantalla de la tercera vista (pestaña dos).

La cuarta vista consiste en unas tablas de proporcionamiento de apoyo para concreto elaborado en obra.

PROPORCIONAMIENTOS PARA CONCRETO HECHO EN OBRA

Resistencia a la compresión:

250

Cantidad de cemento (en sacos):

$\frac{1}{2}$

Volumen de agua (en botes):

$\frac{2}{3}$

Volumen de arena (en botes):

$1 \frac{1}{2}$

Volumen de grava (en botes):

2

CONSIDERACIONES:

- . Usar cemento CPC 30R.
- . Seleccionar agregados sanos y secos.
- . Utilizar agua sin ningún tipo de contaminación.
- . Revolver, colocar y vibrar perfectamente la mezcla.
- . Efectuar un acabado y curado de calidad.
- . Descimbrar entre ocho (clima caliente) y catorce (clima frío) días dependiendo el clima.
- . La grava es de 3/4 de pulgada y la arena de media a fina.

Figura 35 - Captura de pantalla de la cuarta vista (pestaña tres).

La quinta vista consiste en una herramienta basada en las normas técnicas complementarias, para especificar las clasificaciones de exposición de las estructuras de concreto, las cuales son necesarias para considerar en el diseño estructural.

CLASIFICACIONES DE EXPOSICIÓN

Superficie:

De miembros en contacto con el terreno

Ambiente de exposición:

En suelos no agresivos

Clasificación de exposición:

A2

Requisitos:

Los miembros deberán ser curados continuamente por al menos tres días a partir del colado. El concreto deberá tener una resistencia mínima de 200 kg/cm².

Figura 36 - Captura de pantalla de la quinta vista (pestaña cuatro).

La sexta vista consiste en una herramienta para evaluar las condiciones de durabilidad a la que estará una estructura de concreto. Ésta está pensada para ayudar al personal de obra a tener un parámetro de la durabilidad basado en las variantes que pudieran afectar desde la clasificación de exposición hasta un proceso constructivo adecuado (ver **Figura 37**).

Figura 37 - Captura de pantalla de la sexta vista (pestaña cinco).

En la última vista o pestaña se muestran los créditos a los participantes del proyecto y el desarrollador de la aplicación (ver **Figura 38**).



Figura 38 – Última captura de pantalla.

4.2. ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO.

Como estrategia para que la aplicación sea utilizada, en primera instancia se publicará en línea la aplicación para sistema operativo Android y posteriormente se difundirá en redes sociales, se difundirá por demostración en cámaras y colegios de profesionistas de la construcción, así como en centros educativos. La aplicación es gratuita y tendrá acceso a ella todo aquel estudiante, ingeniero, arquitecto o constructor que desarrolle actividades en proyectos en los cuales se utilice el concreto como material de construcción.

El objetivo final del plan de implementación es persuadir a los profesionales de la construcción sobre el verdadero valor del control de calidad en la construcción de obras de concreto, así como también persuadirlos de que los métodos y normativas actuales que rigen el control de calidad es obsoleto y es necesario generar un cambio de paradigmas técnicos y normativos para que el control de calidad de las obras se base en indicadores de durabilidad medidos en tiempo real (sobre la propia estructura o elemento) y no sólo se base en un

parámetro de resistencia a compresión, el cual es diferido a 28 días, se hace sobre probetas estándar y no refleja el comportamiento interno real de la estructura o elemento estructural.

Para lograr implementaciones de este tipo, es fundamental que la gestión de la calidad en las empresas no sea vista como un costo, sino como lo que es: una inversión. Es importante reconocer que la única forma de mantenerse en el mercado y de prosperar, es ofreciendo productos y servicios de mayor calidad.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones experimentales en que se desarrolló este proyecto, se concluye que:

- Las propiedades del concreto convencional en estado fresco como revenimiento, temperatura y peso volumétrico son ligeramente modificadas al adicionar 10% de microsílíce a la mezcla.
- El concreto con 10% de microsílíce desarrolla un mejor comportamiento mecánico (resistencia a compresión, resistencia a flexión y módulo de elasticidad) que el concreto convencional.
- El concreto con 10% de microsílíce mostró un mejor desempeño que el concreto convencional en cuanto a los índices de durabilidad evaluados (porosidad, resistividad eléctrica, migración de cloruros).
- La variable independiente que gobierna el comportamiento de las demás variables es la porosidad del concreto (volumen de poros permeables), misma que en la práctica se manipula con la relación agua-material cementante de una mezcla.
- Las propiedades mecánicas evaluadas por métodos no destructivos (número de rebote, módulo de elasticidad dinámico) tienen una muy buena aproximación a las evaluadas mediante métodos destructivos, con una ligera sobreestimación de los métodos no destructivos.
- Los diagramas de interacción entre tres variables y/o propiedades evaluadas del concreto muestran una buena correlación y son de utilidad para el sector de control de calidad del concreto y para el sector de la ingeniería forense en estructuras de concreto.

- Los diagramas de interacción entre variables y/o propiedades determinadas por métodos destructivos y no destructivos muestran una buena correlación y son de utilidad para el sector de control de calidad del concreto y para el sector de la ingeniería forense en estructuras de concreto.

5.2. RECOMENDACIONES.

En función de los resultados y su análisis se recomienda lo siguiente:

- Ampliar el espectro de resultados con mayor número de ensayos (destructivos y no destructivos) y modificando variables (relaciones agua – material cementante intermedias a las utilizadas, diferentes tipos de agregados, uso de aditivos, diferentes tipos de cemento, diferentes edades de ensayo, diferentes cantidades de microsílice, entre otras).
- No utilizar el método de esclerometría como único método para control de calidad o dictaminar estado de resistencia de un elemento estructural.
- Combinar al menos dos métodos no destructivos con uno destructivo para hacer evaluaciones de la calidad o estado estructural de un elemento de concreto.
- Además de las principales propiedades mecánicas, evaluar por lo menos un índice de durabilidad en los elementos de concreto que estén bajo estudio o bajo control de su calidad.

6. REFERENCIAS DOCUMENTALES Y BIBLIOGRAFÍA.

6.1. REFERENCIAS DOCUMENTALES.

- [1] SKYSCRAPERPAGE. *Cities and Building Database*. 2017; Available from: <http://skyscraperpage.com/>.
- [2] UNIVERSITY, A. *Historical Timeline of Concrete*. 2000; Available from: <http://www.auburn.edu/academic/architecture/bsc/classes/bsc314/timeline/timeline.htm>.
- [3] BROWN, G. E. *Analysis and history of cement*, Gordon E. Edtion ed., 1996.
- [4] Hydraulic Cement, U.S. patent. WHITE, C.
- [5] SNELL, L. M., Y SNELL, BILLIE G. *The Erie Canal—America's First Concrete Classroom*. 2000; Available from: <http://www.siu.edu/~lsnell/erie.htm>.
- [6] Artificial stone, British patent. ASPDIN, J.
- [7] BOWLES, O. Y. T., A. Cement in Latin America. In., 1946.
- [8] VIDAUD, I. Y. E. *El humo de sílice como adición al concreto estructural*. 2011; Available from: <http://www.imcyc.com/revistacyt/sep11/artingenieria.html>.
- [9] DYER, T. *Concrete durability*. Edtion ed.: Crc Press, 2014. ISBN 0203862112.
- [10] MEHTA, P. K. Durability of Concrete--Fifty Years of Progress? Special Publication, 8/1/1991 126.
- [11] HELLIER, C. J. *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Edtion ed., 2003.
- [12] FERNÁNDEZ, C. S. *Resistencia del hormigón mediante esclerómetro o índice de rebote*. 2014; Available from: <https://www.patologiasconstruccion.net/2013/11/resistencia-del-hormigon-mediante-esclerometro-o-indice-de-rebote-1/>.
- [13] BREYSSE, D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*, 2012, 33(1), 139-163.
- [14] RASHID, M., M. MANSUR AND P. PARAMASIVAM Correlations between mechanical properties of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, 14(3), 230-238.
- [15] HUNKA, P., J. KOLISKO, M. VOKAC AND S. REHACEK Test and technological influences on modulus of elasticity of concrete-Recapitulation. *Procedia Engineering*, 2013, 65, 266-272.
- [16] JUROWSKI, K. AND S. GRZESZCZYK The influence of concrete composition on Young's modulus. *Procedia Engineering*, 2015, 108, 584-591.
- [17] BROZOVSKY, J. Comparison of Compressive Strengths of Concrete Testing by Different of Sclerometers. *Procedia Engineering*, 2013, 65, 254-259.
- [18] SAINT-PIERRE, F., A. PHILIBERT, B. GIROUX AND P. RIVARD Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 2016, 125, 1022-1027.
- [19] SABBAĞ, N. AND O. UYANIK Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 141, 13-23.
- [20] HANNACHI, S. AND M. N. GUETTECHE Application of the combined method for evaluating the compressive strength of concrete on site. *Open Journal of Civil Engineering*, 2012, 2(01), 16.

- [21] JAIN, A., A. KATHURIA, A. KUMAR, Y. VERMA, et al. Combined use of non-destructive tests for assessment of strength of concrete in structure. *Procedia Engineering*, 2013, 54, 241-251.
- [22] LAFHAJ, Z., M. GOUEYGOU, A. DJERBI AND M. KACZMAREK Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(4), 625-633.
- [23] RAMEZANIANPOUR, A. A., A. PILVAR, M. MAHDIKHANI AND F. MOODI Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5), 2472-2479.
- [24] BI, J., I. PANE, B. HARIANDJA AND I. IMRAN. The use of nanosilica for improving of concrete compressive strength and durability. In *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publ, 2012, vol. 204, p. 4059-4062.
- [25] LERCH, W. The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes. In.: Portland Cement Association, 1946.
- [26] TANG, F. J. Optimization of Sulfate Form and Content. In.: Portland Cement Association, 1992.
- [27] KOSMATKA, S. H., B. KERKHOFF AND W. C. PANARESE *Design and control of concrete mixtures*. Edition ed.: Portland Cement Assoc., 2011. ISBN 0893122726.
- [28] CORRAL, H.R. Evaluación del desempeño en resistencia y durabilidad de concretos con características de sustentabilidad. Tesis doctoral. Centro de investigación en materiales avanzados., 2011.
- [29] CORRAL, H.R. Apuntes de tecnología avanzada del concreto, maestría en ingeniería de la construcción, UAS. In., 2016.
- [30] HOLLAND, T. C. *Silica fume user's manual*. Edition ed.: Federal Highway Administration, 2005.
- [31] ROSSIGNOLO, J. A. Effect of silica fume and SBR latex on the paste/aggregate interfacial transition zone. *Materials Research*, 2007, 10(1), 83-86.
- [32] ONNCCE NMX-C-192-ONNCCE-2006. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación del número de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro, 2006.
- [33] ONNCCE NMX-C-089-ONNCCE-1997. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de las frecuencias fundamentales, transversal, longitudinal y torsional de especímenes de concreto, 1997.
- [34] ONNCCE NMX-C-514-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción - Resistividad eléctrica del concreto - Especificaciones y métodos de ensayo, 2016.
- [35] ONNCCE NMX-C-275-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la velocidad de pulso a través del concreto - Método de ultrasonido, 2004.
- [36] BUILD, N. 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, 1999.
- [37] REAL, L., D. OLIVEIRA, T. SOARES AND M. MEDEIROS Método colorimétrico por aspersión de nitrato de plata para la evaluación de la penetración de cloruros en concreto: estado del arte. *Revista ALCONPAT*, 2015, 5(2), 151-161.
- [38] HASSAN, A. M. T. AND S. W. JONES Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques. *Construction and Building Materials*, 10// 2012, 35, 361-367.

- [39] HANIM OSMAN, M., W. A. ALARAJI, A. AZIZ SAIM, W. A. MAJID, et al. In-situ strength of concrete using the correlation of different NDT test methods. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2014, 9(23), 19767-19780.
- [40] ABRAMS, D. A. *Design of concrete mixtures*. Edition ed.: Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago, 1919. 20 p.
- [41] HOVER, K. C. CONCRETE DESIGN: PART II. PROPORTIONING WATER, CEMENT, AND AIR. *Civil Engineering News*, 1998, 10(9).
- [42] SHILSTONE, J. S. Concrete mixture optimization. *Concrete International*, 1990, 12(6), 33-39.
- [43] ACI. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), an ACI Report. Committee 318, 2015.
- [44] ACI. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, ACI 211.1-91. Committee 211, 1991.
- [45] ACI. Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete, ACI 211.3R-97. Committee 211, 1997.
- [46] HOVER, K. Graphical Approach to Mixture Proportioning by ACI 211.1-91. *Concrete International*, 1995, 17(9), 49-53.
- [47] INTERNATIONAL, A. ASTM C33/C33M-16e1. Standard Specification for Concrete Aggregates, 2016.
- [48] INTERNATIONAL, A. ASTM C31/C31M-17. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, 2017.
- [49] INTERNATIONAL, A. ASTM C29/C29M-17a. Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.
- [50] ONNCCE NMX-C-073-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba, 2004.
- [51] ACI. Guide for Concrete Floor and Slab Construction, ACI 302.1R-96. Committee 302, 1996.
- [52] ACI. Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures, ACI 357R-84. Committee 357, 1987.
- [53] ACI. Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete, ACI 214-77. Committee 214, 1997.
- [54] INTERNATIONAL, A. ASTM C192/C192M-16a. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C192 / C192M - 16a). West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- [55] ONNCCE NMX-C-159-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo, 2016.
- [56] INTERNATIONAL, A. ASTM C138/C138M-17a. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, 2017.
- [57] ONNCCE NMX-C-162-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba, 2014.
- [58] ONNCCE NMX-C-152-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Densidad, 2015.
- [59] INTERNATIONAL, A. ASTM C188-16. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, 2016.
- [60] CAÑAS, U. C. J. S. Determinación del peso específico del cemento. In.: *Laboratorio de Materiales de Construcción*, 2006.

- [61] ONNCCE NMX-C-030-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agregados - Muestreo, 2004.
- [62] INTERNATIONAL, A. ASTM C702/C702M-11. Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size, 2011.
- [63] ONNCCE NMX-C-170-ONNCCE-1997. Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo Al Tamaño Requerido para las Pruebas, 1997.
- [64] INTERNATIONAL, A. ASTM D75/D75M-14 Standard Practice for Sampling Aggregates, 2014.
- [65] ONNCCE NMX-C-084-2006-ONNCCE. Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Partículas Más Finas Que la Criba 0,075 Mm (No. 200) por Medio de lavado - Método de Prueba, 2006.
- [66] INTERNATIONAL, A. ASTM C136/C136M-14. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, 2014.
- [67] ONNCCE NMX-C-077-1997-ONNCCE. Industria de la Construcción - Agregados para Concreto - Análisis Granulométrico - Método de Prueba, 1997.
- [68] ONNCCE NMX-C-164-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso, 2014.
- [69] INTERNATIONAL, A. ASTM C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, 2015.
- [70] ONNCCE NMX-C-165-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino, 2014.
- [71] INTERNATIONAL, A. ASTM C128-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, 2015.
- [72] ONNCCE NMX-C-166-ONNCCE-2006. Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Prueba, 2006.
- [73] INTERNATIONAL, A. ASTM C566-13. Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying, 2013.
- [74] CONCRETO, I. M. D. C. Y. D. *Fabricación del concreto, capítulo 5, Elaboración del concreto*. Edtion ed., 2003.
- [75] ONNCCE NMX-C-122-ONNCCE-2004. Industria de la Construcción - Agua para concreto - Especificaciones, 2004.
- [76] ONNCCE NMX-C-156-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del revenimiento en el concreto fresco, 2010.
- [77] INTERNATIONAL, A. ASTM C143/C143M-15a. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, 2015.
- [78] ONNCCE NMX-C-435-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación de la temperatura del concreto fresco, 2010.
- [79] INTERNATIONAL, A. ASTM C1064/C1064M-17. Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete, 2017.
- [80] COMMITTEE, A. 306. Guide to cold weather concreting (ACI306R-16), 2016.
- [81] COMMITTEE, A. 305. Hot Weather Concreting (ACI305.1-14), 2014.
- [82] BASF. *Vaciado de concreto en climas fríos*. 2006.
- [83] INTERNATIONAL, A. ASTM C805/C805M-13a. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, 2013.

- [84] INTERNATIONAL, A. ASTM C215-14. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, 2014.
- [85] INTERNATIONAL, A. ASTM C1760-12. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, 2012.
- [86] INTERNATIONAL, A. ASTM C597-16. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, 2016.
- [87] KLEIN, T. P. V. PERMEABILIDAD A CLORUROS EN HORMIGONES MARÍTIMOS 2015.
- [88] ONNCCE NMX-C-083-ONNCCE-2014. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes - Método de ensayo, 2014.
- [89] INTERNATIONAL, A. ASTM C39/C39M-17b. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2017.
- [90] ONNCCE NMX-C-191-ONNCCE-2015. Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro, 2015.
- [91] INTERNATIONAL, A. ASTM C78/C78M-16. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), 2016.
- [92] ONNCCE NMX-C-128-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción - Concreto sometido a compresión - Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson, 2013.
- [93] INTERNATIONAL, A. ASTM C469/C469M-14. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, 2014.
- [94] ONNCCE NMX-C-263-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico Endurecido - Determinación de la masa específica, absorción y vacíos, 2010.
- [95] INTERNATIONAL, A. ASTM C642-13. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2013.
- [96] ONNCCE NMX-C-161-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción - Concreto fresco - Muestreo, 2013.
- [97] INTERNATIONAL, A. ASTM C172/C172M-7. Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete, 2017.
- [98] INTERNATIONAL, A. ASTM C31/C31M-1. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, 2018.
- [99] INTERNATIONAL, A. ASTM C192/C192M-16a. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, 2016.
- [100] ONNCCE NMX-C-148-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento - Condiciones de diseño y operación, 2010.
- [101] INTERNATIONAL, A. ASTM C511-13. Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes, 2013.
- [102] ONNCCE NMX-C-109-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Cabeceo de especímenes, 2013.
- [103] INTERNATIONAL, A. ASTM C617/C617M-15. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, 2015.

- [104] INTERNATIONAL, A. ASTM C109/C109M-16. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2016.
- [105] ONNCCE NMX-C-469-ONNCCE-2013. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Uso de casquetes no adheridos para la determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto endurecido - Método de preparación, 2013.
- [106] INTERNATIONAL, A. ASTM C1231/C1231M-15. Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens, 2013.
- [107] ONNCCE NMX-C-414-ONNCCE-2016. Industria de la Construcción - Cementantes Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Ensayo, 2016.

7. ANEXOS.

7.1. ANEXO 1. Diagramas triples de interacción no presentados en sección de resultados.

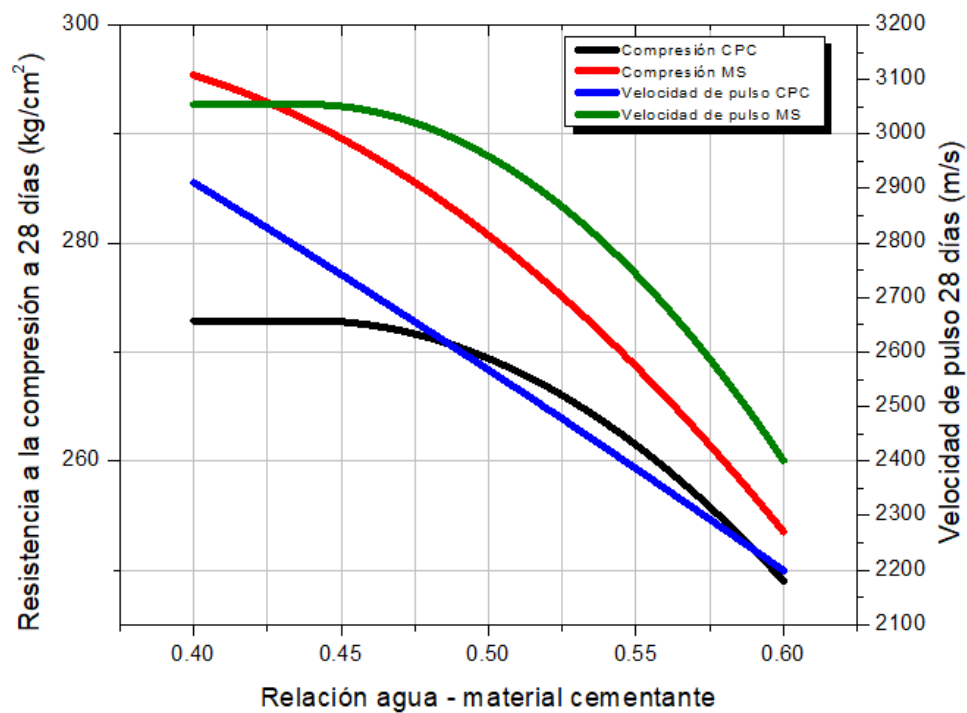


Figura 39 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

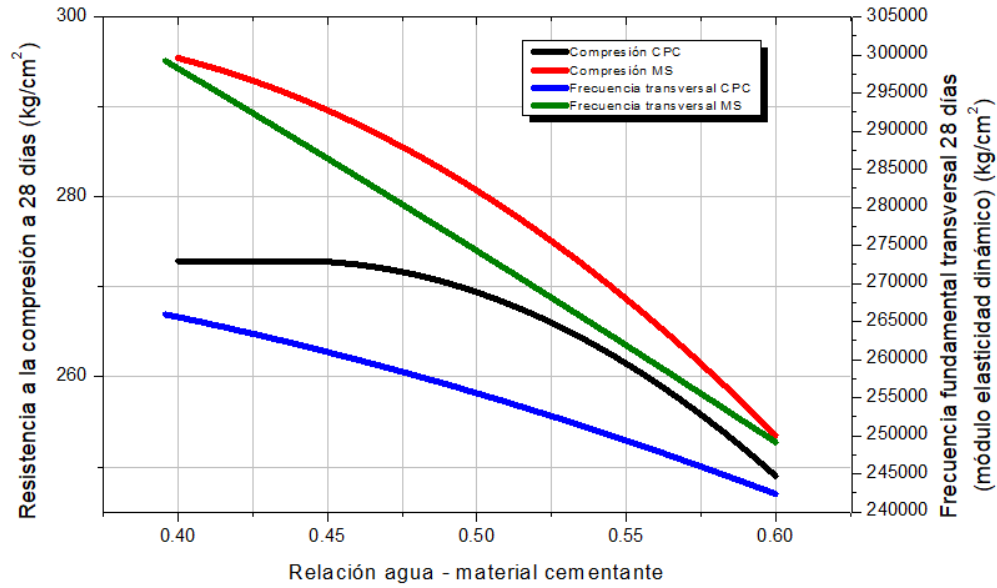


Figura 40 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

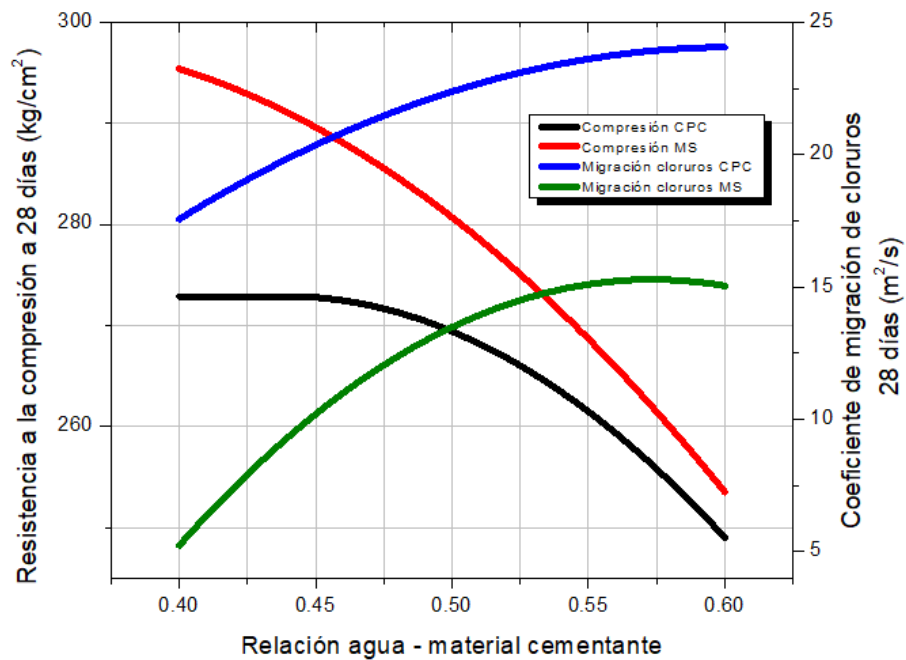


Figura 41 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

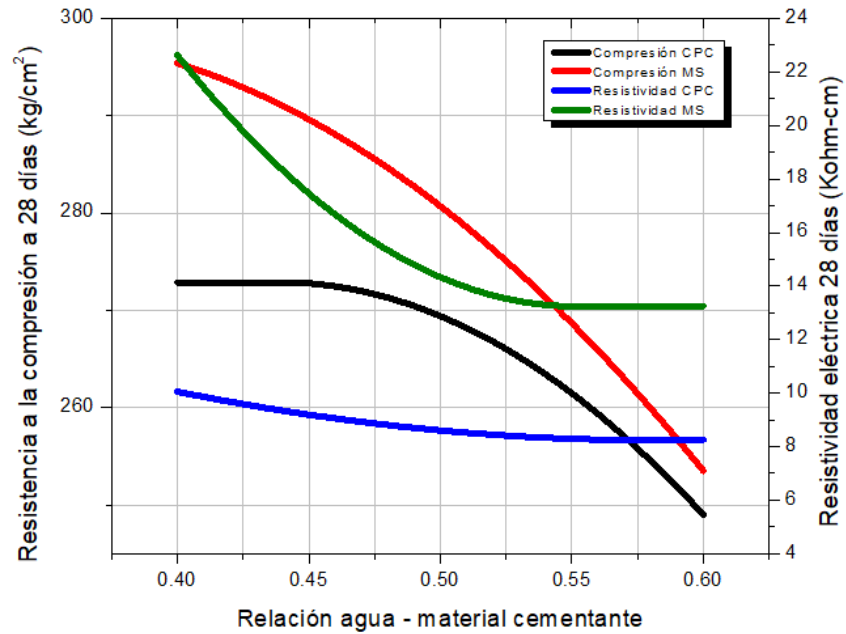


Figura 42 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la compresión y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

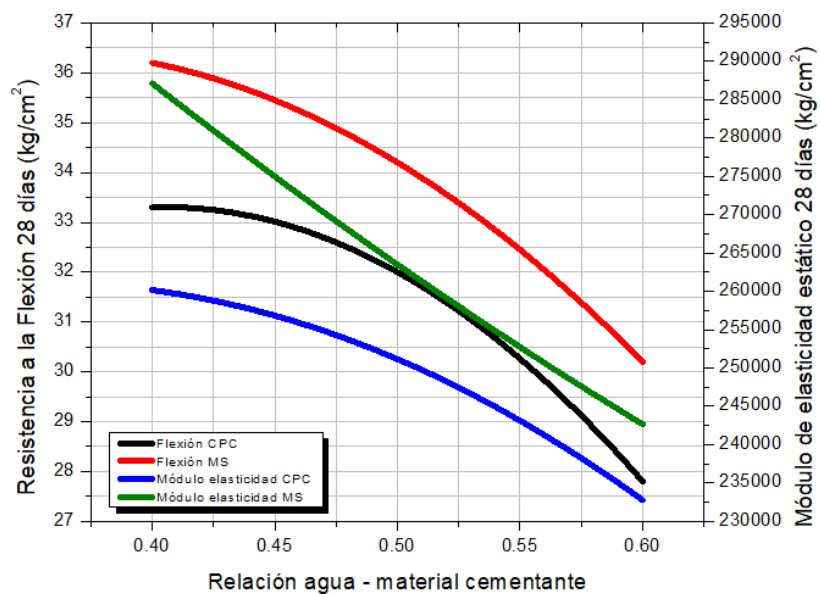


Figura 43 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad estático a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

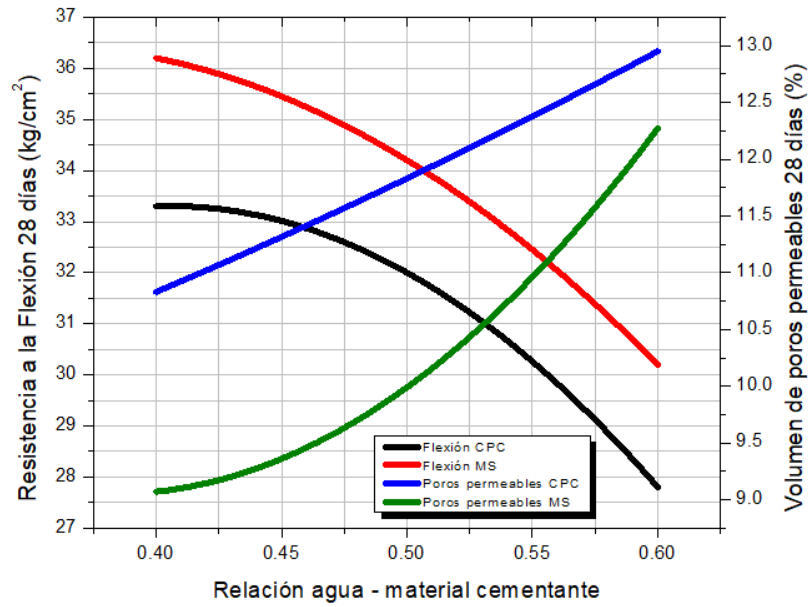


Figura 44 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y el volumen de poros permeables a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

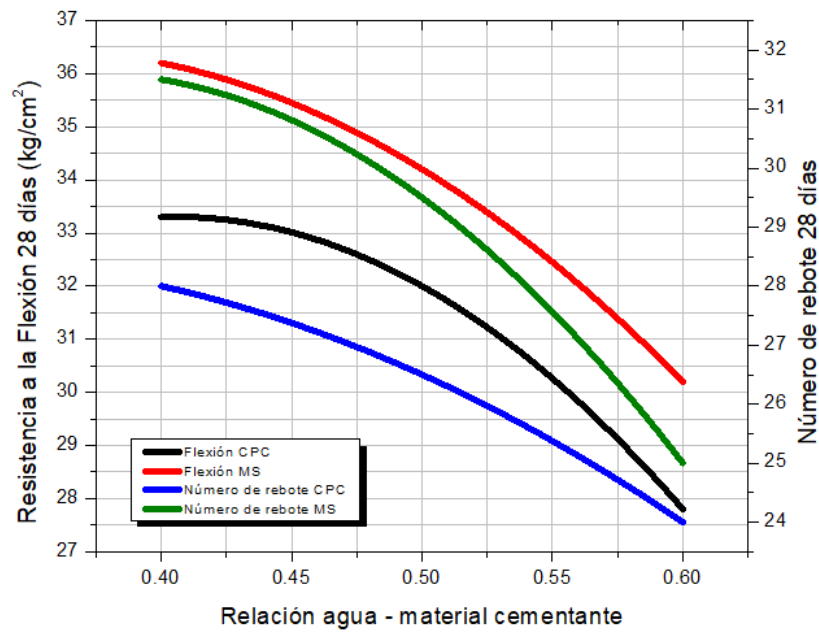


Figura 45 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

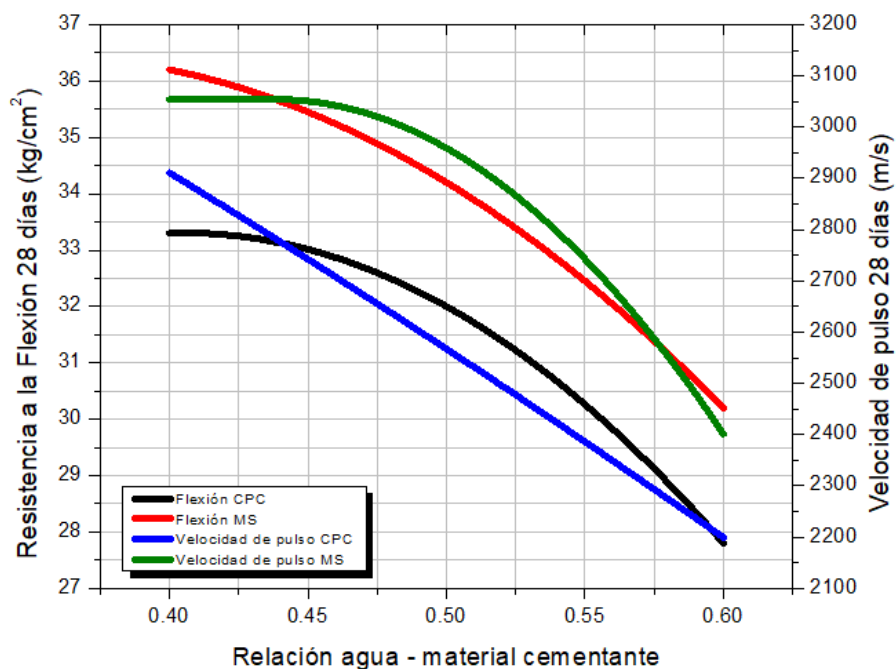


Figura 46 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

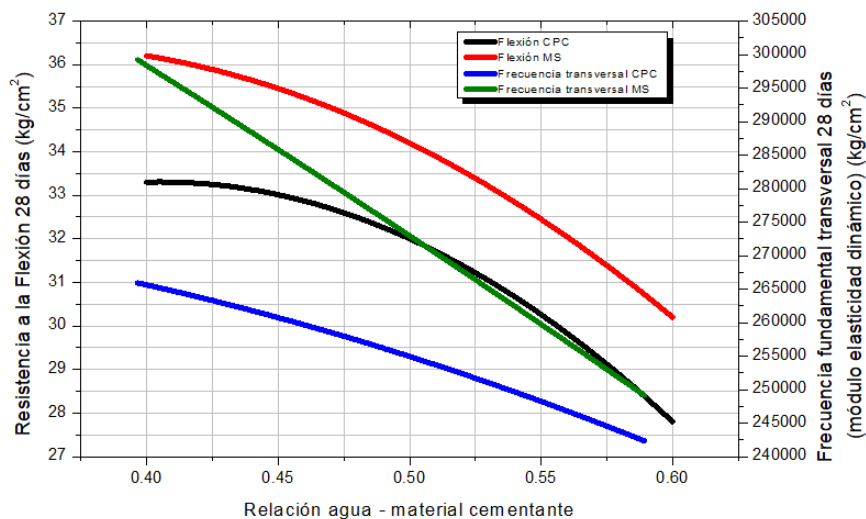


Figura 47 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

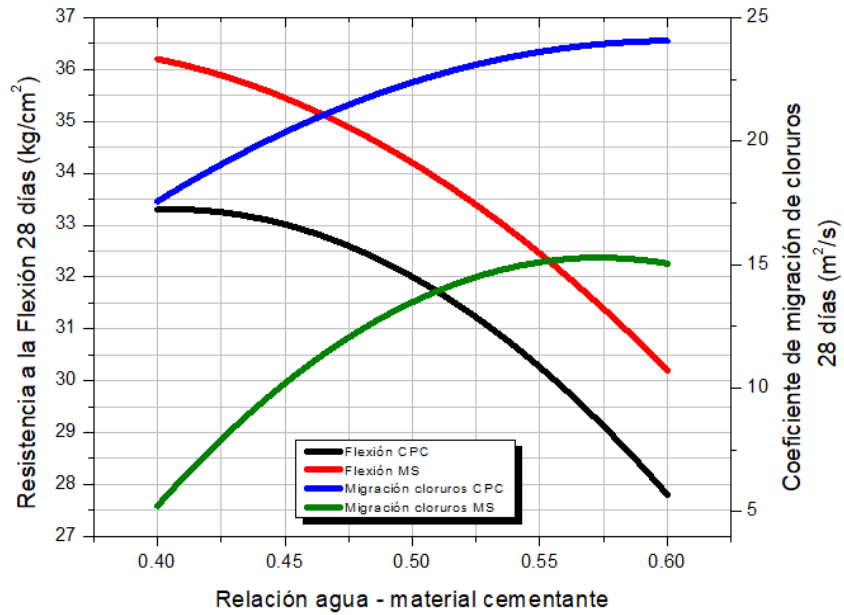


Figura 48 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

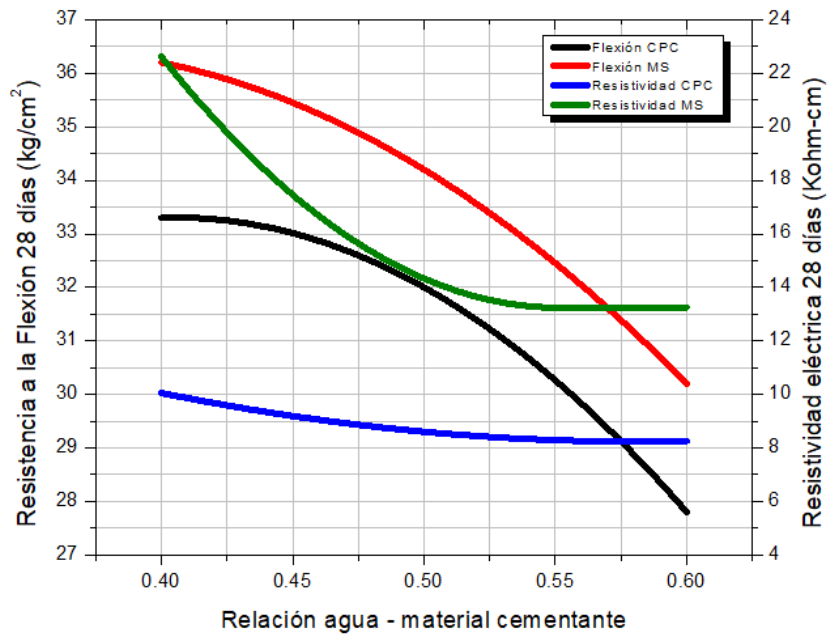


Figura 49 - Diagrama triple de interacción para correlacionar la resistencia a la flexión y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

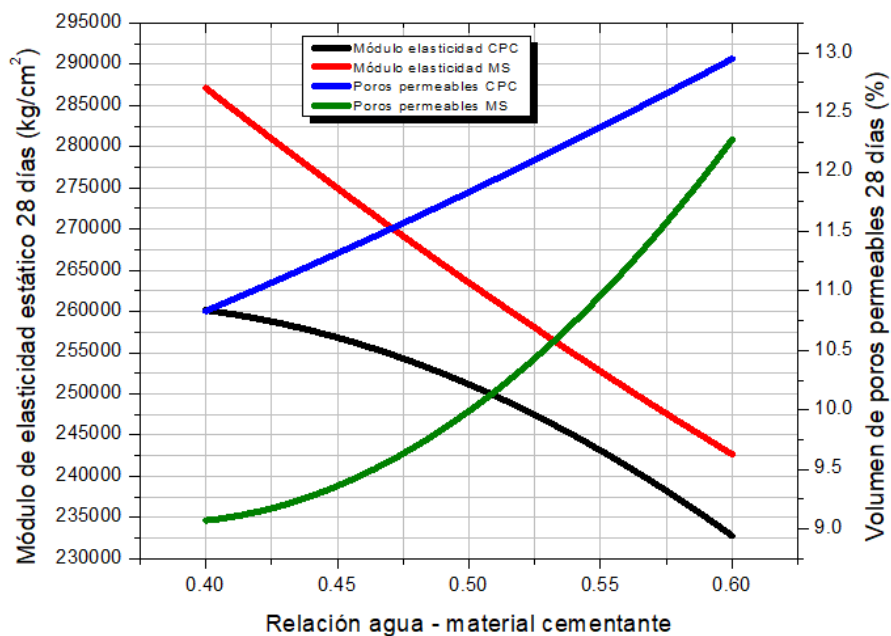


Figura 50 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y volumen de poros permeables a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

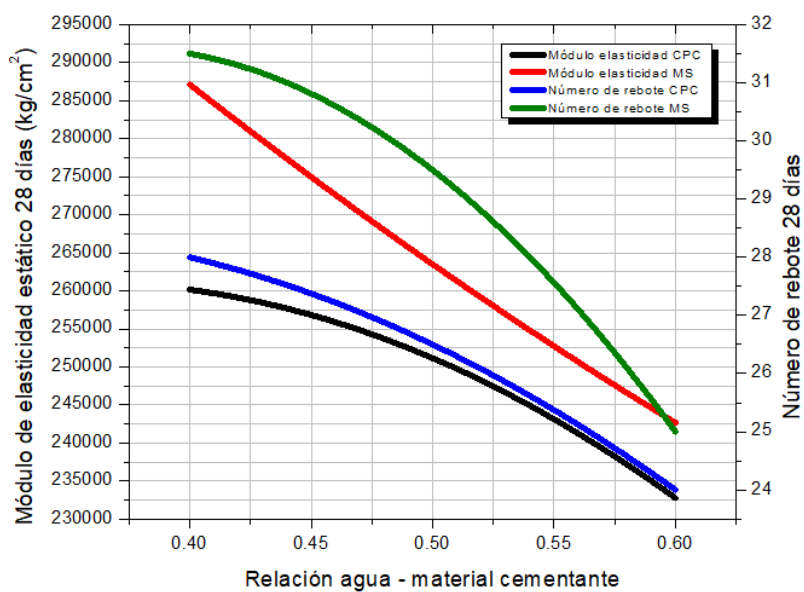


Figura 51 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

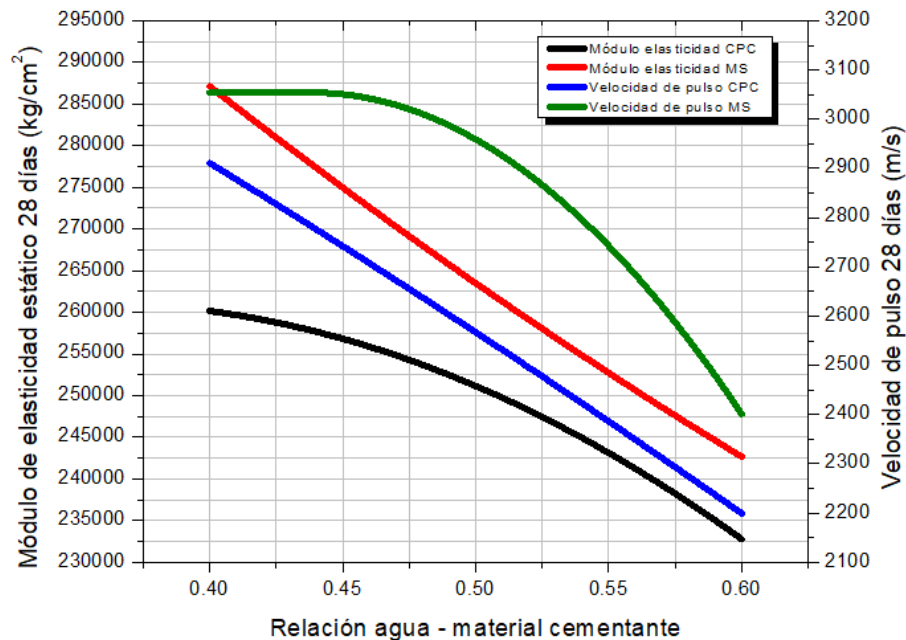


Figura 52 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

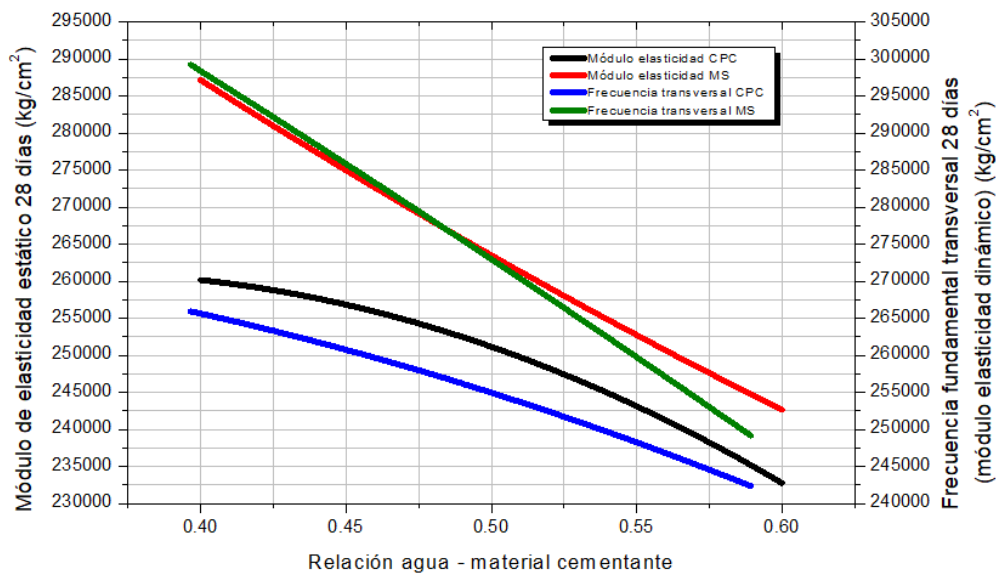


Figura 53 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

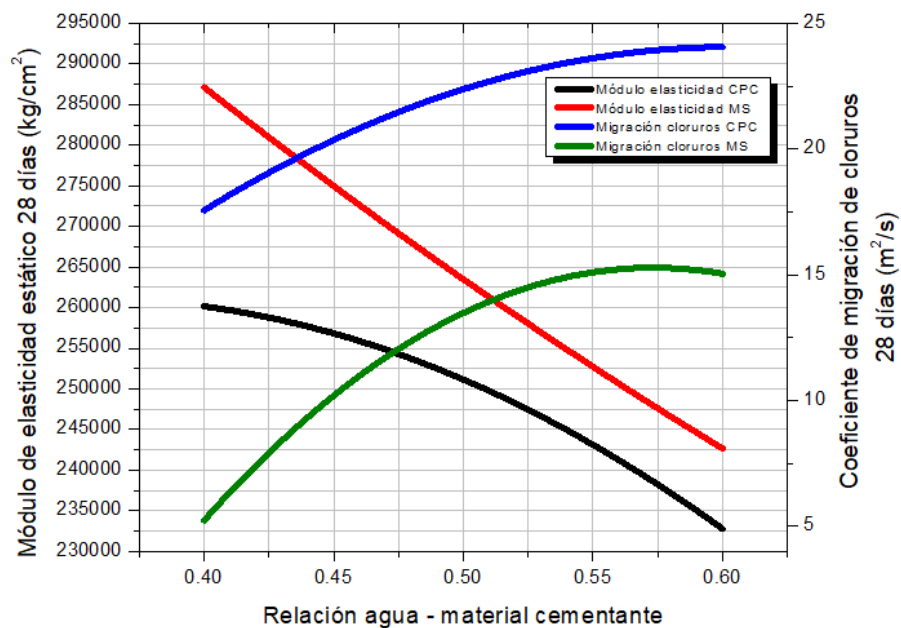


Figura 54 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

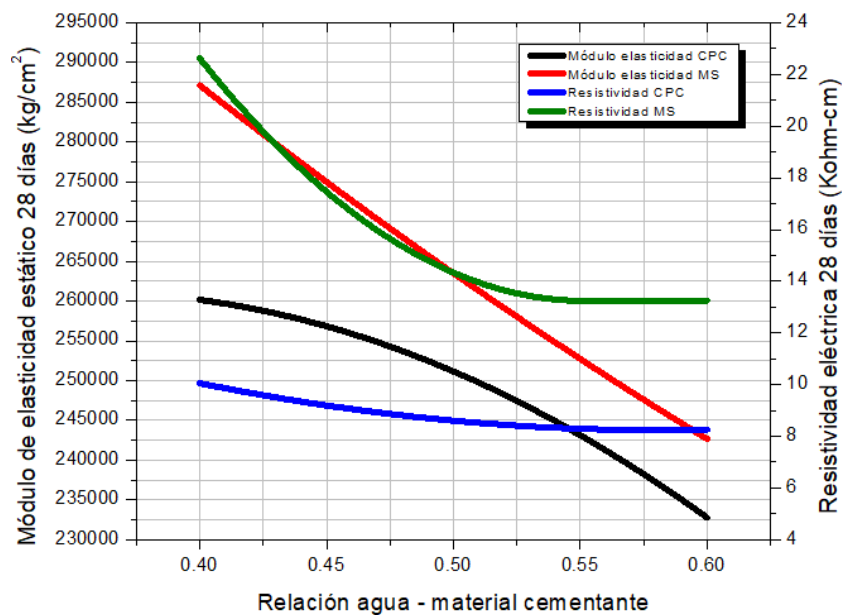


Figura 55 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad estático y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

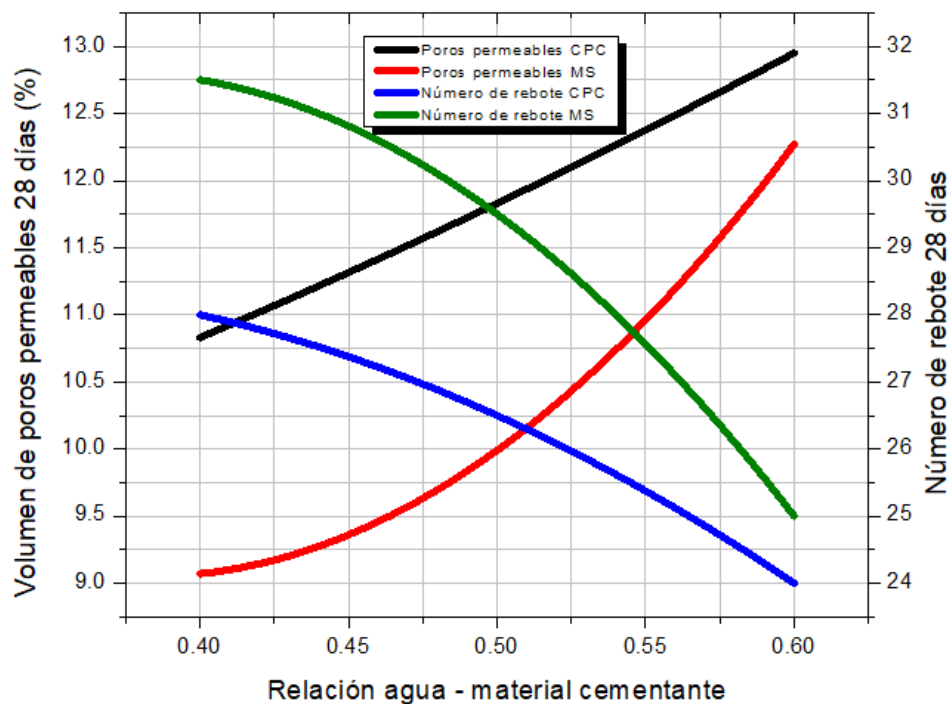


Figura 56 - Diagrama triple de interacción para volumen de poros permeables y número de rebote a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

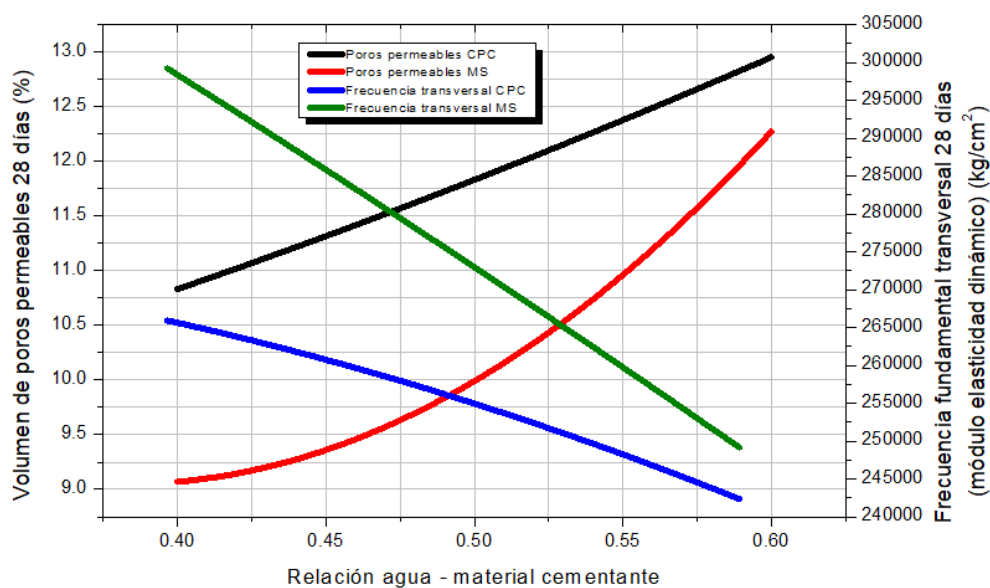


Figura 57 - Diagrama triple de interacción para correlacionar volumen de poros permeables y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

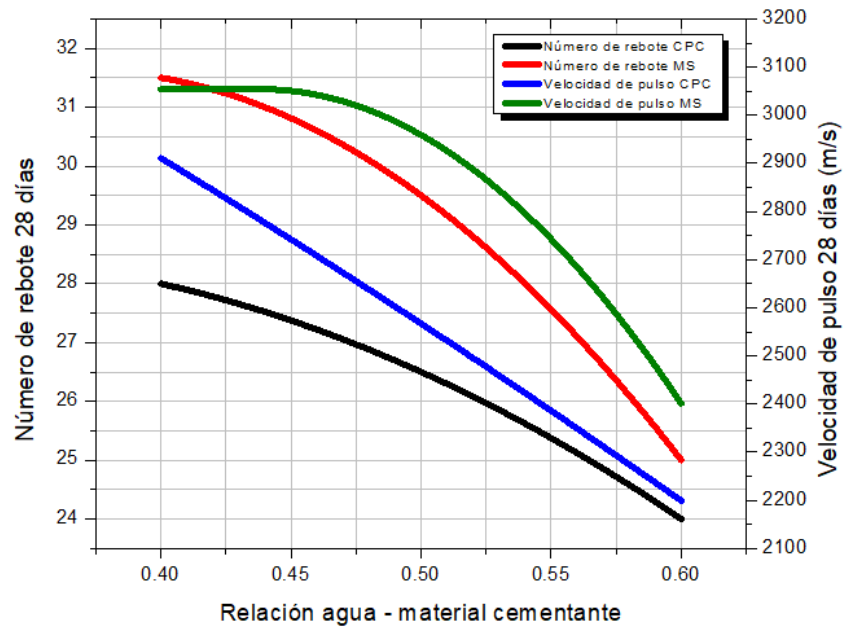


Figura 58 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y velocidad de pulso a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

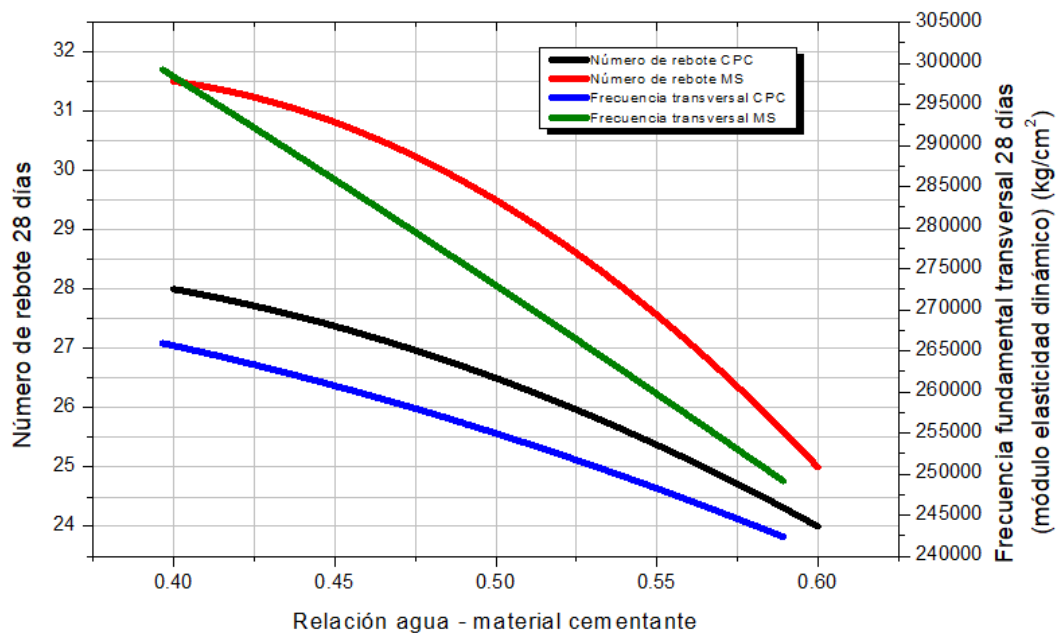


Figura 59 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y módulo de elasticidad dinámico a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

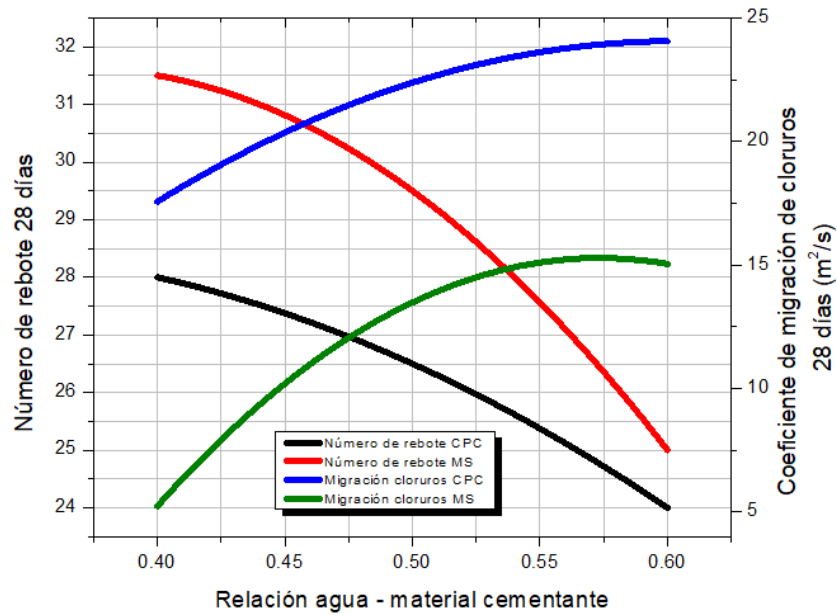


Figura 60 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

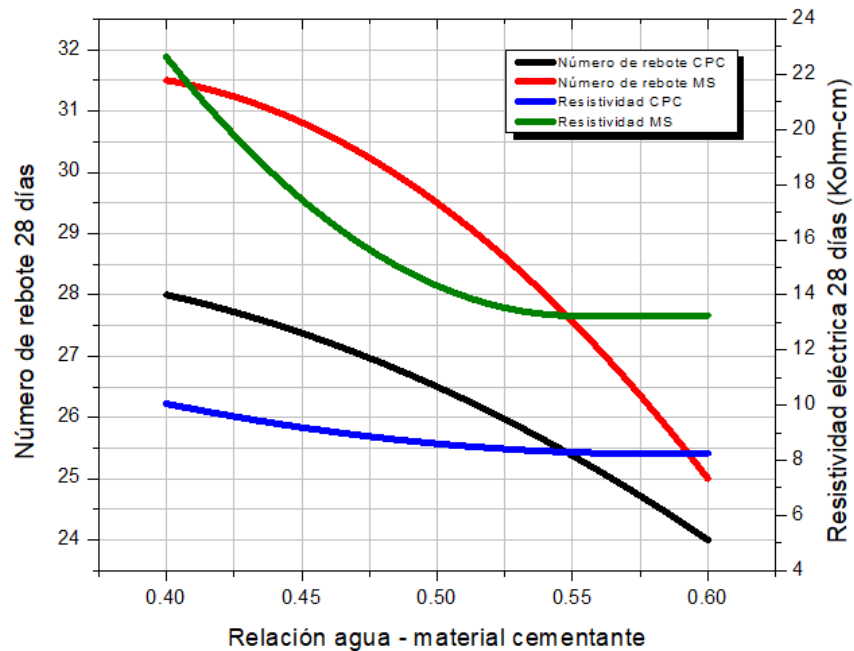


Figura 61 - Diagrama triple de interacción para correlacionar número de rebote y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

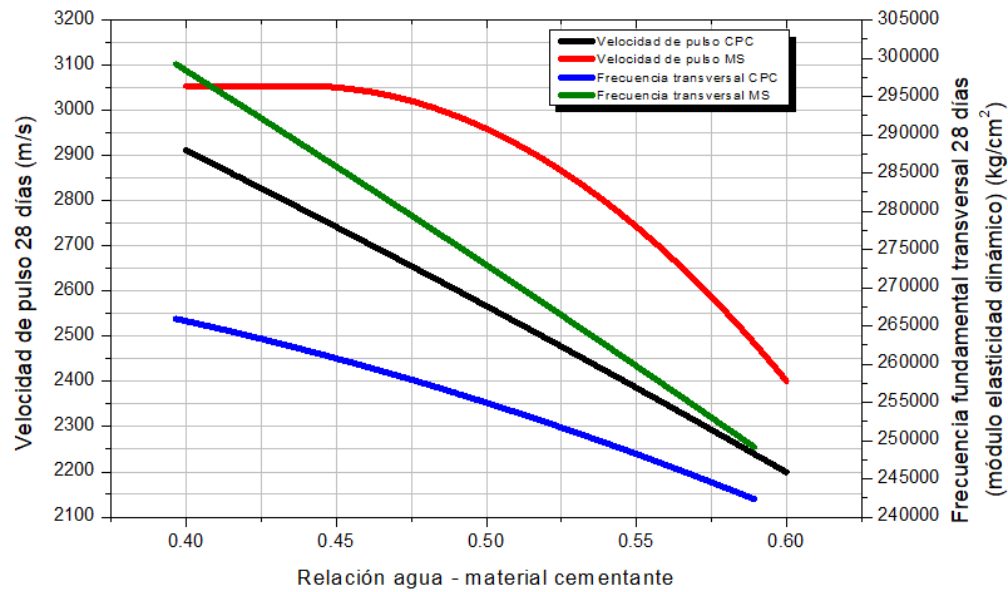


Figura 62 - Diagrama triple de interacción para correlacionar velocidad de pulso y módulo de elasticidad dinámica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

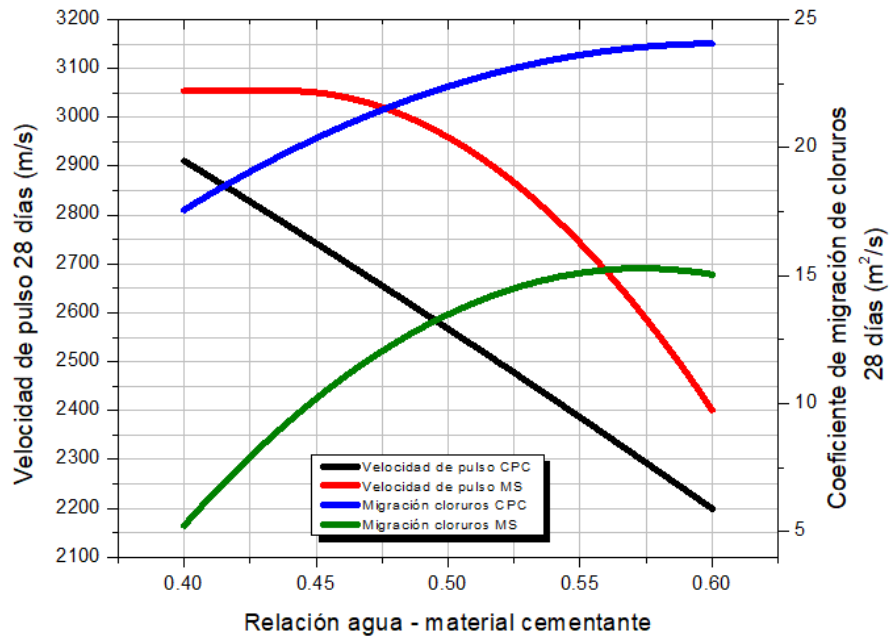


Figura 63 - Diagrama triple de interacción para correlacionar velocidad de pulso y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

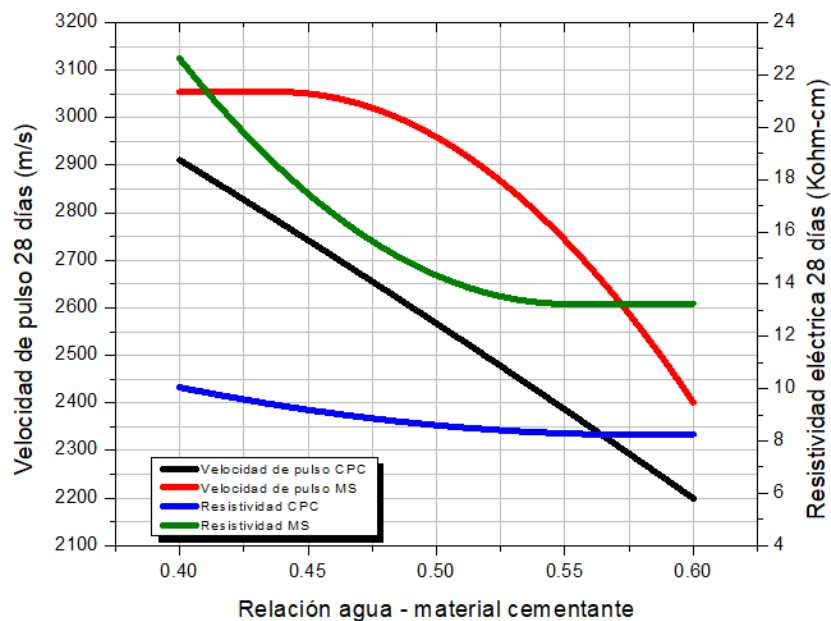


Figura 64 - Diagrama triple de interacción para correlacionar velocidad de pulso y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

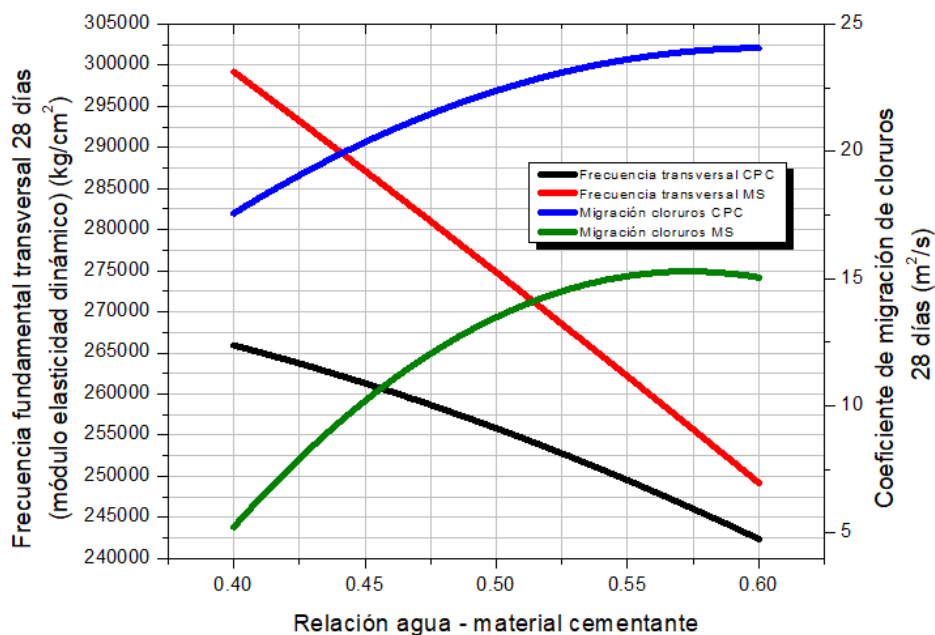


Figura 65 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad dinámico y coeficiente de migración de cloruros a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

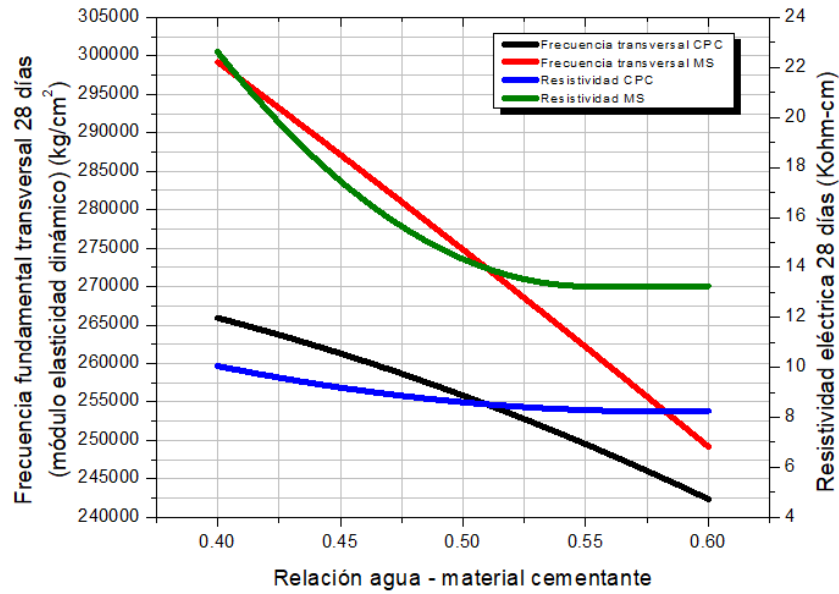


Figura 66 - Diagrama triple de interacción para correlacionar módulo de elasticidad dinámico y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

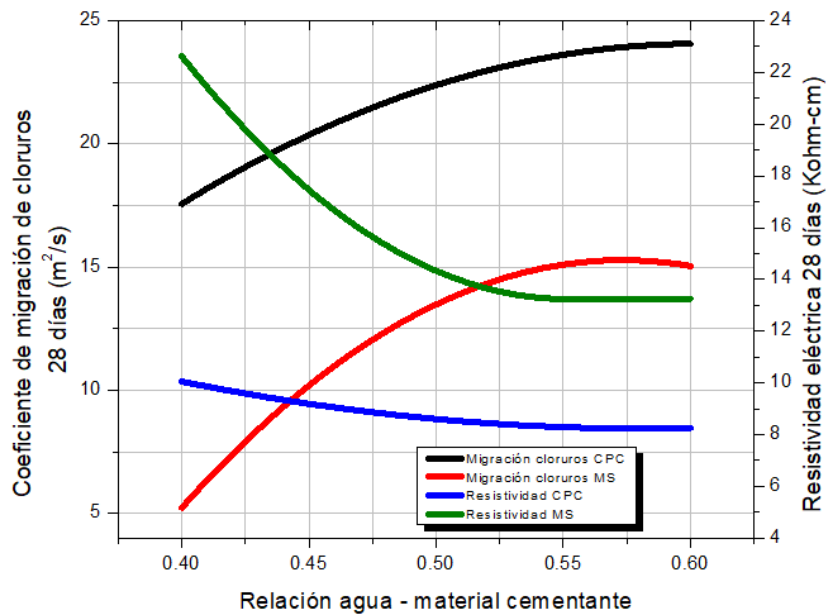


Figura 67 - Diagrama triple de interacción para correlacionar coeficiente de migración de cloruros y resistividad eléctrica a 28 días, en función de la relación agua - material cementante.

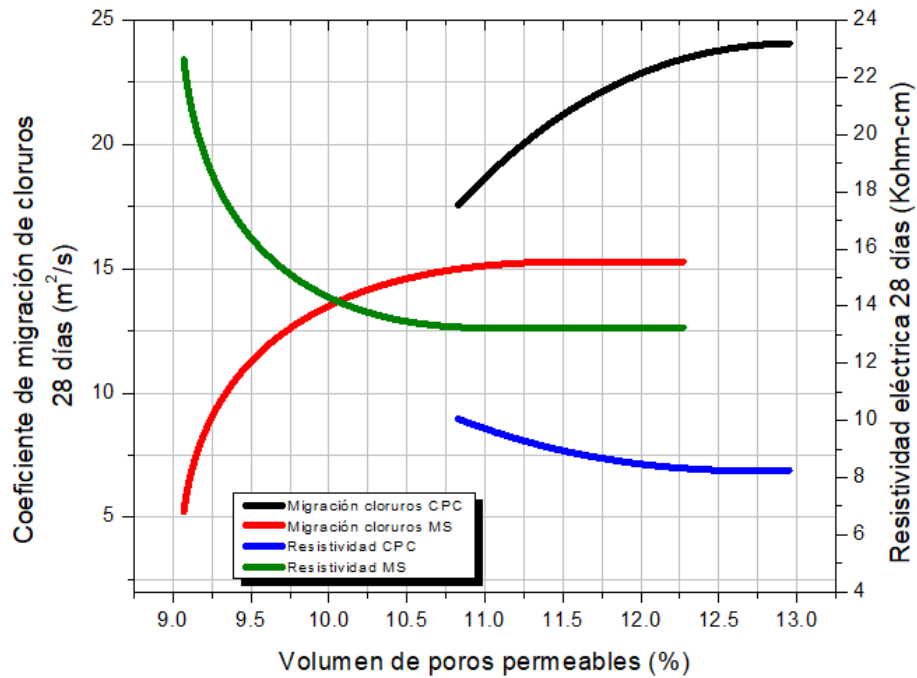


Figura 68 - Diagrama triple de interacción para correlacionar coeficiente de migración de cloruros y resistividad eléctrica a 28 días, en función del volumen de poros permeables.